

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.41    NO.3    September 2002

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 41 卷 第 3 号 (Vol. 41, No. 3), 2002 年 9 月 (September 2002)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 緩く堆積した地盤の波浪による液状化について  
..... 鈴木高二郎・高橋重雄 ..... 1  
(Liquefaction of Loose Deposited Sandbed due to Ocean Wave  
..... Kojiro SUZUKI and Shigeo TAKAHASHI)
2. 河口域における溶存酸素濃度の動態  
—長良川河口堰下流部におけるモニタリングデータの解析—  
..... 中村由行・栗木秀治・藤野智亮 ..... 19  
(Dynamics of dissolved oxygen in an estuary -Analysis based on monitoring data obtained in the lower reaches of a  
rivermouth barrage of the Nagara River -  
..... Yoshiyuki NAKAMURA, Hideharu KURIKI and Tomoaki FUJINO)
3. 海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上に関する研究  
..... 渡邊弘子・岩波光保・濱田秀則・横田弘 ..... 49  
(A Study on Durability Enhancement of Marine Structures Covered with Marine Aquatic Fouling Organisms  
..... Hiroko WATANABE, Mitsuyasu IWANAMI, Hidenori HAMADA and Hiroshi YOKOTA)

## 海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上に関する研究

渡邊 弘子\*・岩波 光保\*\*・濱田 秀則\*\*\*・横田 弘\*\*\*\*

### 要 旨

四方を海洋に囲まれた我が国では海洋環境下に位置する構造物が多いが、海洋構造物は塩分環境下に曝されており、特に、鉄筋コンクリート構造物としては非常に厳しい環境下にある。そのため、海洋コンクリート構造物の耐久性向上については、これまで種々の研究が行われてきた。一方、海洋環境にある干満帯及び海中中部においては構造物表面に海生生物が付着し、このような箇所ではコンクリートの耐久性が相対的に向上することが経験的に知られてきた。しかし、海生生物は別名汚損生物と呼ばれ、海生生物の付着は一般的に忌避すべきこととして扱われてきた。それは、一部鋼構造物の腐食促進や海水利用放水路の流量低下等、生物付着により構造物の機能低下が誘引されるためである。しかし、現在では地球規模での環境保全が重要かつ緊急課題であり、海洋環境下においても生物の棲息する豊かな自然環境の保護に努める必要が生じている。

そこで本研究では、海洋コンクリート構造物の耐久性を向上させる表面被覆材料として海生生物に着目し、生物付着が耐久性向上に及ぼす効果を定量的に把握するとともに海生生物の有効利用について検討することを目的とした。本報告に述べる研究内容は以下のとおりである。

- (1) 実海洋環境下において鉄筋コンクリート供試体を用いた約 2 年間の暴露試験を実施した。その結果、海生生物は付着するコンクリート表面にセメントペーストよりも緻密な組織構造の付着層を生成していることを明らかにした。この付着層は、コンクリートに比べて塩化物イオン拡散係数が約 1/100 程度であるとの解析結果を得た。
- (2) 海生生物をコンクリート表面に積極的に付着させる条件として、付着初期にはコンクリートのアルカリ度を低減させる混和材の使用が望ましく、その後はコンクリート中の空隙率が大きくなるような配合が適していることを明らかにした。
- (3) 海生生物はその緻密な付着層によってコンクリート内部への塩化物イオンや酸素の浸入を抑制し、ひいては内部鉄筋の腐食速度を低減していることを明らかにした。
- (4) 生物付着を構造物劣化モデルに基づいた性能設計に当てはめてパラメタスタディを行った結果、生物付着程度に応じて構造物の耐用年数が延長されることを示した。
- (5) 生物付着効果を積極的に実構造物へ適用する方法についての検討及び生物付着を促進した構造物のメンテナンス技術についての検討を行った。

キーワード：海生生物，海洋コンクリート構造物，耐久性，塩化物イオン，鉄筋腐食，性能設計

\* 前 材料研究室特別研究員（前 運輸施設整備事業団運輸技術研究員）

\*\* 構造強度研究室研究官

\*\*\* 材料研究室長

\*\*\*\* 構造強度研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5059 Fax：0468-44-0255 e-mail:iwanami@pari.go.jp

## A Study on Durability Enhancement of Marine Structures Covered with Marine Aquatic Fouling Organisms

Hiroko WATANABE\*  
Mitsuyasu IWANAMI\*\*  
Hidenori HAMADA\*\*\*  
Hiroshi YOKOTA\*\*\*\*

### Synopsis

In Japan, the island country, many concrete structures are located under marine environment. These structures are exposed in severe conditions, where heavy deterioration is generally observed due to chloride attack by seawater splashing and sea breeze. Therefore, a lot of studies on durability enhancement of reinforced concrete structures under marine environment were carried out. On the other hand, the tidal and submerged parts of marine concrete structures are generally covered with marine aquatic organisms. Empirically, deterioration of organically covered concrete is not so severe. It can be presumed that the layer of organisms may inhibit penetration of substances such as chloride ions into concrete. In this study, this hypothesis is examined through laboratory and field exposure tests for about two years. This study will contribute to not only durability enhancement of marine concrete structures, but also preservation of marine ecological systems. The following conclusions were drawn by this study.

(1) The membrane layer of barnacles was mainly composed of calcium carbonate with protein. The layer is denser than cement paste matrix. A chloride ion diffusion coefficient of the membrane layer is about 1/100 as that of concrete.

(2) Low alkaline mix of concrete is suitable for the marine fouling organisms to attach to concrete surface at the earlier stage of attachment. After the earlier stage, concrete with much voids is suitable for promoting the attachment.

(3) The chloride ion diffusion coefficient, the oxygen diffusion coefficient and the corrosion rate of rebars decreased as the amount of marine fouling organisms increased. Also, the corrosion of rebars decreased with increase in the length of the crack right above the rebars covered by marine fouling organisms.

(4) On the basis of the time-dependent deterioration progress model of reinforced concrete structures, it is made clear that the lifespan of structures can be extended by attachment of organisms.

(5) Technical methods of marine fouling organisms attachment to real concrete structures were proposed. Also, life cycle maintenance method of organically covered structures were discussed.

**Key Words:** marine aquatic fouling organisms, marine concrete structures, durability, chloride ion, steel corrosion, performance based design

---

\* Ex-Research Fellow, Materials Division (from Corporation for Advanced Transport and Technology)

\*\* Researcher, Structural Mechanics Division

\*\*\* Head, Materials Division

\*\*\*\* Head, Structural Mechanics Division

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

Phone : +81-468-44-5059 Fax : +81-468-44-0255 e-mail:iwanami@pari.go.jp



## 目 次

要 旨 .....	49
1. 序論 .....	53
1.1 研究の背景及び目的 .....	53
1.2 研究の概要 .....	53
2. 試験方法 .....	54
2.1 使用材料及び配合 .....	54
2.2 供試体種類 .....	54
2.3 実海洋下における暴露試験 .....	54
3. 暴露試験における付着生物に関する検討 .....	57
3.1 付着生物の種類 .....	57
3.2 付着層の主成分及び組織構造 .....	57
3.3 付着生物の付着量及び付着面積率 .....	57
3.4 付着に及ぼす水質の影響 .....	59
3.5 生物の付着志向性 .....	59
4. 付着基盤の性状が海生生物付着に及ぼす影響に関する検討 .....	61
4.1 実海洋環境下における暴露試験 .....	61
4.2 バイオフィルム着生試験 .....	63
4.3 キプリス幼生付着試験 .....	64
4.4 生物付着を促進させる材料、配合及び表面形状の提案 .....	65
5. 海生生物による鉄筋の腐食抑制に関する検討 .....	66
5.1 自然電位 .....	66
5.2 鉄筋腐食状況 .....	68
5.3 塩化物イオン含有量 .....	68
5.4 塩化物イオン拡散係数 .....	70
5.5 酸素拡散係数 .....	71
5.6 鉄筋腐食速度 .....	72
5.7 力学性能 .....	73
5.8 生物付着が鉄筋の腐食抑制に及ぼす効果 .....	78
6. 生物付着効果を考慮した性能設計手法に関する検討 .....	78
6.1 鉄筋腐食を対象とした構造物の劣化モデルの提案 .....	79
6.2 提案モデルによるパラメタスタディ .....	79
6.3 塩化物イオンの浸透予測 .....	80
6.4 コンクリート中の鋼材の腐食進行予測 .....	81

7. 生物付着効果の実用化に関する検討	83
7.1 実構造物への適用方法	83
7.2 コンクリート構造物の維持管理	84
8. 結論	85
9. あとがき	85
謝辞	86
参考文献	87
付録	88

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景及び目的

我が国においては、今後、海洋資源開発、海上交通、海上生活など様々な海洋開発が促進されるものと考えられ、それに伴い、海洋環境に位置する構造物の建設も増加してゆくものと予想される。また、枯渇しつつある資源を節約し、かつ建設的遺産を後世に伝えてゆくためには既設構造物を十分に活用することも重要である。しかし、海洋構造物は高濃度の塩分環境下に曝されており、特に、鉄筋コンクリート構造物としては非常に厳しい環境にあると言える。そのため、新設既設を問わず、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を向上させる方法についての研究は、これまで数多くの研究者らによって行われてきた<sup>1),2)</sup>。

一方において、海洋環境下では干満帯及び海中部に於いて構造物表面に海生生物が付着し、このような箇所ではコンクリートの耐久性が相対的に向上することが定性的に知られてきた。

しかし、海生生物は別名汚損生物と呼ばれ、海生生物の付着は一般的に忌避すべきこととして扱われてきた。それは、生物付着による一部鋼構造物の腐食促進や海水利用放取水路等の流量低下、あるいは海生生物の死骸による機械設備の故障等、生物付着により構造物の機能低下が誘引されることがあるためである。そのため、海生生物の付着に対しては、これまでその忌避剤の研究が盛んに進められてきた<sup>3)</sup>。だが、現在では地球規模での環境保全が重要かつ緊急課題であり、海洋環境下においても生物の棲息する豊かな自然環境の保護に努める必要が生じている。

そこで本研究では、海生生物を海洋コンクリート構造物の耐久性を向上させる表面被覆材料として捉え、海生生物がコンクリート構造物の耐久性向上に及ぼす影響について定量的に把握するとともに、海生生物の有効利用について検討することを目的とした。この点が本研究の独創的な点である。海生生物が周囲の海水を浄化する作用を持つことは良く知られており<sup>4),5)</sup>、海生生物を積極的に付着促進させることは、構造物自体の耐久性を向上させるのみならず、周辺環境の保全に資する構造物の建設を可能とし、今後の海洋開発及び既設構造物の維持管理において極めて重要な技術になると考えられる。

なお、本報告においては、海洋構造物として特に海洋コンクリート構造物を対象とした。生物付着効果は鋼構造物の耐久性向上に対しても有効であると考えられるが<sup>6),7)</sup>、本研究では取り扱っていない。

### 1.2 研究の概要

本報告の構成を図-1に示し、以下にその内容を述べる。

1章では、本研究の背景、研究目的及び概要を述べる。

2章では、本研究において実施した試験に用いた材料、コンクリートの配合、及び供試体種類について述べる。また、本研究内容に共通しかつ最も重要である、海生生物の付着及びコンクリート中の鉄筋腐食を目的とした実海洋環境下における暴露試験の方法について述べる。本研究において実施した試験は多岐に亘るため、セメント硬化体や付着生物に関する分析試験、鉄筋腐食に関する促進試験等、その他個々に実施した試験についてはその記述のある章節で述べることとする。

3章では、暴露試験により得られた海生生物の付着性状に関する項目について述べる。具体的には、付着生物の種類、付着層の組織構造、付着量についての結果を整理する。また、付着性状に及ぼす水質の影響について考察を行い、実海洋環境下において見られる付着の志向性について取りまとめる。

4章では、3章で得られた暴露試験結果を基に、海生生物の付着対象となるコンクリート、モルタル等の基盤の性状が付着に及ぼす影響について検討を行う。また、生物の付着志向性に関する短期試験を行い、長期における暴露試験結果との比較を実施する。これらの試験結果を基に、生物付着を促進させる材料、配合及びコンクリートの表面形状についての提案を行う。

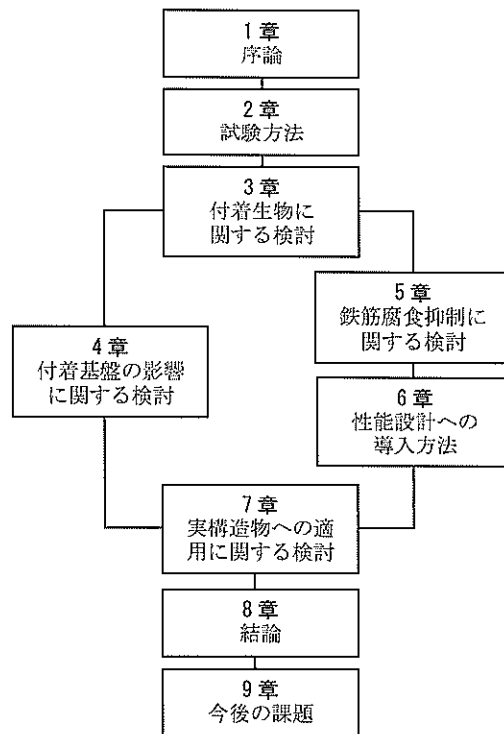


図-1 本報告の構成

5章では、海生生物の付着がコンクリート中の鉄筋の腐食抑制に及ぼす影響について検討を行う。鉄筋の腐食程度及び腐食進行に関わる測定値として、暴露試験における自然電位、鉄筋腐食状況、及び塩化物イオン浸透量を、また、室内促進試験における塩化物イオン拡散係数、酸素拡散係数、及び鉄筋腐食速度を取り上げ、これらの測定値と生物付着量との関係について整理する。また、大型 RC 梁供試体を用いた曲げ試験を実施し、生物付着が部材の力学性能に及ぼす影響についても取りまとめる。

6章では、5章で得られた結果を基に、生物付着効果を性能設計に導入する方法について検討を行う。まず、鉄筋腐食を対象とした構造物の劣化モデルを提案し、次に、海生生物が成長する過程でのコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測、及びコンクリート中の鋼材の腐食進行予測を行う。最終的に、提案モデルを用いたパラメタスタディを実施し、生物付着量が構造物の耐久性に及ぼす効果を定量的に示す。

7章では、生物付着効果を実構造物に適用する方法についての提案を行う。また、不確定要因の多い生物付着という自然現象に対して、構造物の維持管理方法について検討を行う。

8章では、本研究で得られた成果を総括する。

9章では、本研究を通じて明らかとなった問題点及び今後の課題に言及する。

## 2. 試験方法

本章では、使用材料、配合、及び供試体種類について述べる。また、本研究内容に共通しかつ最も重要である、海生生物の付着及びコンクリート中の鉄筋腐食を目的とした実海洋環境下における暴露試験の方法について述べる。

### 2.1 使用材料及び配合

試験に用いた結合材の物理的性質及び化学組成を表

-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント (OPC) 及び低熱ポルトランドセメント (LPC) を、混和材には一般的な混和材として、高炉スラグ (BFS)、フライアッシュ II 種 (FA)、エトリンガイト系高強度混和材 (HA) を用いた。また、この他に、特殊な鉱物質系混和材として、酸化鉄、水酸化マグネシウム、水和熱抑制型膨張材及びポリマーエマルジョンを用いた。粗骨材には高規産砕石 (密度2.71, 粗粒率6.97) を、細骨材には野洲川産川砂 (密度2.58, 粗粒率2.77) を用いた。混和剤にはリグニン系AE減水剤 (標準型) を用いた。

コンクリート、モルタル及びセメントペーストの配合を表-2に示す。A~Fは一般的な混和材を用い、水結合材比、混和材の有無及びその種類をパラメタとした基本的な配合である。これに対し、G~Kは、従来、海藻等が付着し易いと言われる鉱物質系混和材をフライアッシュと組み合わせた配合で、モルタルの細孔溶液中のアルカリ度を小さくすることで、アルカリ度が高い場合には付着しにくい海生生物の付着を促進することを目的とした配合である。さらに、L及びMは、セメントに低熱ポルトランドセメントを、混和材にポリマーエマルジョンを用いてアルカリ度をG~K配合よりも低減させた配合で、特にLには炭酸化処理を行い、アルカリ度をさらに低くした。すべての配合の粗骨材最大寸法は25mm、フレッシュコンクリートのスランプの範囲は12±2.5cm、空気量の範囲は水結合材比55%の場合は4.5±1.5%、水結合材比40%の場合は3.0±1.5%と設定した。

### 2.2 供試体種類

供試体は、測定目的に応じて表-3に示す寸法のものを作製した。このうち、力学性能試験用大型 RC 梁供試体の仕様は5章5.7節で詳述する。供試体作製に使用した配合、供試体数量及び暴露場所を表-3に併せて示す。

### 2.3 実海洋環境下における暴露試験

海生生物の付着及びコンクリート中の鉄筋腐食を目的として、実海洋環境下における暴露試験を実施した。

表-1 結合材の物理的性質及び化学組成

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学組成 (%)									
			強熱減量	不溶残分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
OPC	3.15	3396	1.34	-	20.7	2.6	5.91	64.0	1.6	1.8	0.60	-
LPC	3.24	5250	0.64	-	25.8	3.7	3.23	62.4	0.5	2.5	0.56	-
BFS	2.87	4270	0.60	0.1	32.8	0.8	14.3	43.0	4.4	1.9	0.16	0.25
FA	2.20	3380	1.00	-	52.0	5.5	24.8	10.3	2.5	0.2	1.62	0.72
HA	2.51	6000	12.5	-	44.8	-	-	19.4	-	19.3	0.75	2.94

表-2 コンクリート、モルタル及びセメントペーストの配合

No.	水結合材比	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
		水	セメント	高炉スラグ	フライアッシュ	高強度混和材	鉱物質系混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
A	0.55	176	320	-	-	-	-	793	986	0.8
B	0.55	176	176	144	-	-	-	765	986	0.8
C	0.55	176	22	-	96	-	-	748	986	0.8
D	0.40	170	420	-	-	-	-	748	986	1.05
E	0.40	145	316	-	-	47	-	847	986	-
F	0.40	145	221	-	95	47	-	821	986	-
G	0.40	145	253	-	63	47	-	830	986	-
H	0.40	145	284	-	32	47	-	838	986	-
I	0.40	145	221	-	95	47	6.32 *1	821	986	-
J	0.40	145	221	-	95	47	6.32 *2	821	986	-
K	0.55	176	203	-	87	-	25 *3	752	986	0.8
L	0.55	160	291	-	-	-	-	881	986	0.7
M	0.55	160	291	-	-	-	-	881	986	0.7
VM	-	40	100	-	-	-	10 *4	200	-	-
VP	-	40	100	-	-	-	10 *4	-	-	-

\*1:酸化鉄 \*2:酸化マグネシウム \*3:エトリンガイト系膨張剤 (カルシウムサルファアルミネート)

\*4:ポリマーエマルジョン (固形分)

表-3 供試体一覧

試験目的	供試体寸法 (mm)	配合及び供試体数量					備考
		清水港		本渡港	港空研海水循環水槽		
		干満帯	海中部	干満帯	干満帯	海中部	
生物付着	300×300×100	A~F, L, M 各2	A~F, L, M 各2	A~K 各2	-	-	
鉄筋腐食	100×100×400	A~F 各6	-	A~F 各6	Aのみ 6	-	・RC供試体 (φ16mm×1本) ・各3体に曲げひび割れ
圧縮強度	100×100×400	A~F, L, M 各2	A~F, L, M 各2	A~F 各2	A~F 各4	A~F 各2	
塩化物イオン含有量	150×150×150 100×100×200	A~F, L, M 各3	A~F, L, M 各3	A~K 各2	A~F, L, M 各3	L, M 各2	・モルタル
微細構造	150×150×150 100×100×200	A~F 各2	-	G, I, K 各2	-	L, M 各2	・セメントペースト
力学性能	200×300× 2400	A 8 *1	-	A 4 *2	A 5 *3	-	・RC供試体 (主筋φ16mm×3本) ・供試体仕様は欄外に表示
力学性能 供試体管理用	φ100×200	A 6	-	A 7	A 5	-	

\*1:ひび割れなし (5体), 初期ひび割れ0.3mm, 電食軽度, 電食重度

\*2:ひび割れなし, 初期ひび割れ0.1mm, 初期ひび割れ0.3mm, かぶり小

\*3:ひび割れなし (2体), 初期ひび割れ0.1mm, 初期ひび割れ0.3mm, 電食軽度

暴露試験場として選択した地域は、過去に実施したコンクリート供試体の現地暴露試験結果を参考に、気候が温暖で生物が付着し易いと考えられる静岡県清水地区及び熊本県天草地区である。候補地として現地調査を行った場所を表-4に示す。現地調査の結果、既存構造物に海生生物が付着している実績があり、かつコンクリート供試体の設置が容易であることから、静岡県清水地区では清水港三保のケーソンヤード波除堤を、熊本県天草地区では本渡港岸壁を暴露試験場として決定した。暴露試験場の位置を図-2に示す。

暴露試験場における自然条件は以下のとおりである。清水港は駿河湾の内湾に位置しており干満差が約1.6mと比較的小さく、波浪は穏やかで年平均気温は16.0℃である。既存構造物に付着している海生生物の種類はフジツボ類、カキ類、及びムラサキガイ等であった。一方、本渡港は有明海の外湾に面しており、干満差が約5.5mと日本では有数の大干満地帯に属している。年平均気温は17.1℃で、既存構造物に付着している海生生物はフジツボ類、カキ類、二枚貝、管棲ゴカイ等であった。

供試体は、付着生物の種類や付着量及び波浪、日射、



乾燥等自然条件の影響を確認するため、清水港では干満帯及び海中部に、本渡港では干満帯に暴露した。ここで、干満帯とは、干潮位と満潮位の間に位置する潮汐の影響を受ける範囲のことで、供試体は干潮時には海面上に出現するが、満潮時には海面下に没する。これに対し、海中部とは常時海面下に位置する場所であり、供試体が海面上に出現することはない。清水港及び本渡港では、海面上及び海面下にある時間が同程度であるよう、供試体は干満帯の高さの中央付近に暴露した。

これら二箇所の実海洋環境下における暴露試験場に対し、海生生物が付着しない場合の暴露試験場として港湾空港技術研究所内の海水循環水槽を使用した。海水循環水槽では、水槽内に久里浜湾の海水を取り入れて人工的に干満を作り出しており、その干満差は1.5mである。一日における干満サイクルを図-3に示す。なお、久里浜湾における年平均気温は15.0℃である。

供試体の暴露状況を写真-1に示す。全ての供試体は表面に海生生物が付着し易いよう、直立させた状態で暴露することを基本とした。

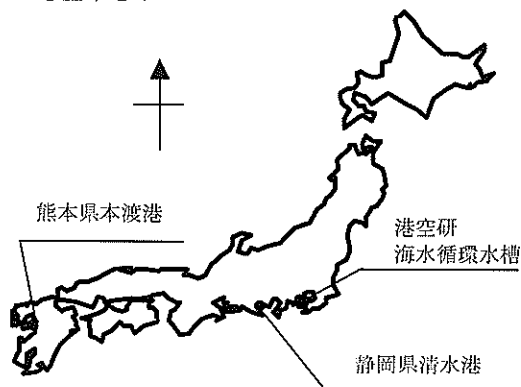


図-2 暴露試験場位置図

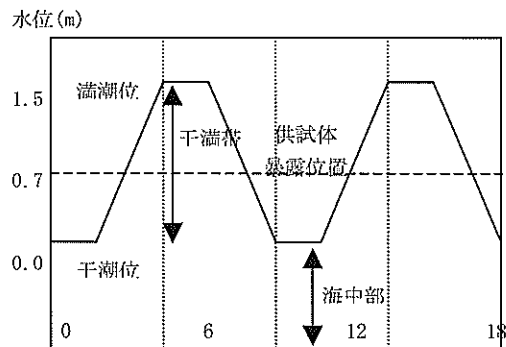


図-3 海水循環水槽の干満サイクル

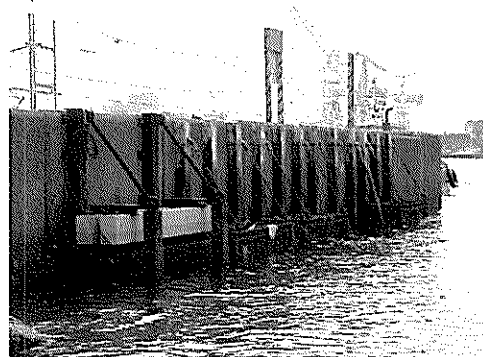


写真-1(1) 供試体暴露状況 (清水港)

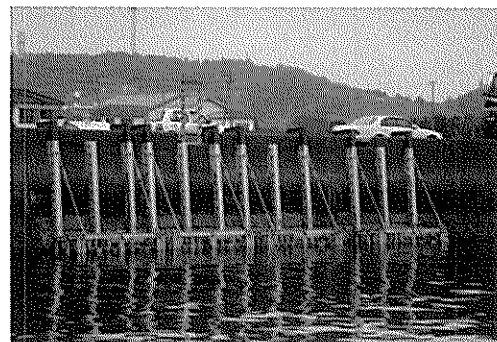


写真-1(2) 供試体暴露状況 (本渡港)

表-4 暴露試験場候補地の現地調査結果

県	港	地区及び構造物	生物付着	暴露中の測定の難易	施工の難易	その他	総合判定
静岡県	清水港	三保地区 ケソヤード波除堤	多	容易	容易	重機進入容易	○採用
	清水港	外港防波堤	多	困難	やや困難	波浪大	△
	清水港	興津地区 第一埠頭岸壁	あり	やや困難	容易	船舶の接岸あり	×
	清水港	日の出地区 耐震岸壁	あり	やや困難	容易	船舶の接岸あり	×
	清水港	富士見地区 富士見埠頭	あり	容易	容易	船舶の接岸あり	×
熊本県	富岡港	岸壁	あり	やや困難	困難	矢板式岸壁	×
	高浜港	岸壁	無	容易	容易	海水浴場あり	×
	牛深港	岸壁	あり	容易	容易	陸路遠距離	△
	鬼池港	岸壁	あり	容易	やや困難	重機進入困難	△
	本渡港	岸壁	多	やや困難	容易	重機進入容易	○採用

### 3. 暴露試験における付着生物に関する検討

本章では、暴露試験より得られた海生生物の付着性について述べる。まず、付着生物の種類を同定し、付着層の組織構造及び付着量についての結果を整理した。また、付着に及ぼす海水の水質の影響について考察を行い、実海洋環境下において見られる付着の志向性について取りまとめた。

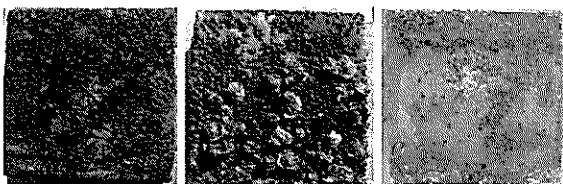
#### 3.1 付着生物の種類

清水港及び本渡港において暴露期間6ヶ月時点で300×300×100mm供試体において観察された生物の一例を写真-2に示す。写真-2に示す供試体はA配合であるが、他の配合においても同様の生物が観察された。専門図書<sup>8)~12)</sup>によれば、主として観察された生物は、清水港海中部においては、チゴケムシ、シロボヤ、ゴカイ等、清水港及び本渡港の両干満帯ではフジツボ類及びカキ類であった。これらは、両地域に特有のものではなく全国的に一般に観察される種類の生物である。また、両港においては、供試体に付着すると同時に周囲の岸壁にも同種生物の付着が認められた。

#### 3.2 付着層の主成分及び組織構造

検討に用いた供試体は、300×300×100mm及び150×150×150mmのコンクリート供試体で、28日間水中養生した後、清水港及び本渡港の干満帯に暴露したものである。

写真-3にフジツボの付着層を示す。これは、コンクリート表面に付着したフジツボ個体を除去した後の底殻部分である。本報告においては、この底殻を付着層と呼ぶ。この付着層の主成分は、既往の文献<sup>13),14)</sup>及び本研究において実施した粉末X線回折によれば、主として炭酸カルシウムを主成分としたセメント系物質で、炭酸カルシウムの他にマグネシウム、ナトリウム、ストロンチウム、マンガン等の無機物、及びグリシン、アルギニン、アスパラギン酸、プロリン等の有機物（質量比にして1~2%）から構成され、これら無機物と有機物とが層状構造を成して付着層を形成していた。この付着層のSEM



清水港海中部      清水港干満帯      本渡港干満帯

写真-2 生物付着状況 (暴露期間6ヶ月: A配合)

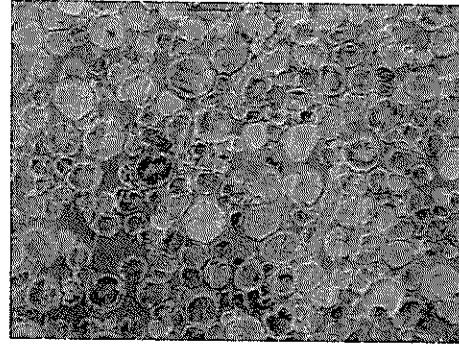


写真-3 コンクリート表面に残るフジツボの付着層

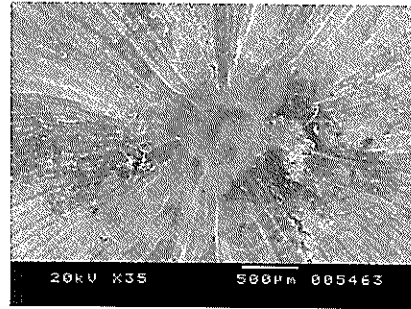


写真-4(1) フジツボの付着層 (正面)

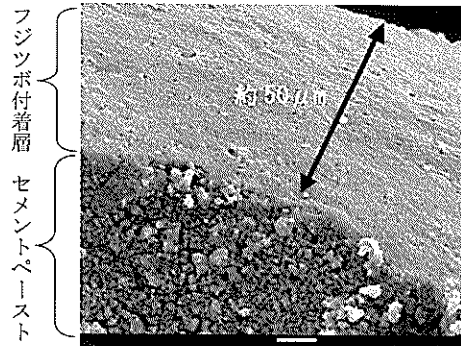


写真-4(2) フジツボの付着層 (断面)

による正面及び断面写真を写真-4に示す。このように、付着層は厚さ約0.05mm程度で、セメントペーストよりも緻密な組織を有した無機有機複合材料であることが明らかとなった。

#### 3.3 付着生物の付着量及び付着面積率

清水港及び本渡港における付着生物の付着量及び付着面積率の経時変化を図-4に示す。測定対象とした供試体は300×300×100mm供試体で、測定値は供試体2体の平均値である。ここで、付着量は供試体表面に付着した全生物の湿潤質量とし、単位面積あたりにおける付着量の変化として表した。また、付着面積率は300×300mmの2面を対象とし、供試体表面より付着生物を除去した後に残る付着層の面積を対象面積に対する比率として表

した。

図-4より、付着量及び付着面積率ともに、暴露期間の経過に伴って順調に増加していることが認められる。ただし、清水港海中部においては、暴露初期から付着面積率は100%に達しており、その後は付着した生物の成長及び新たな生物の付着により付着量が増加している。これは、海中部では日射や波浪の影響が干満帯に比べて小さく、生物の付着及び成長が容易であり、かつ、付着生物

の種類が干満帯とは異なるためと考えられる。

また、清水港に比較して本渡港においては、暴露初期から付着量及び付着面積率とも小さく、暴露期間1年8ヶ月までのその後の伸びも緩やかであることがわかる。この理由は、次節でも述べるように、本渡港を含む有明海一帯で暴露試験期間中に大規模に発生した赤潮の影響と考えられた。

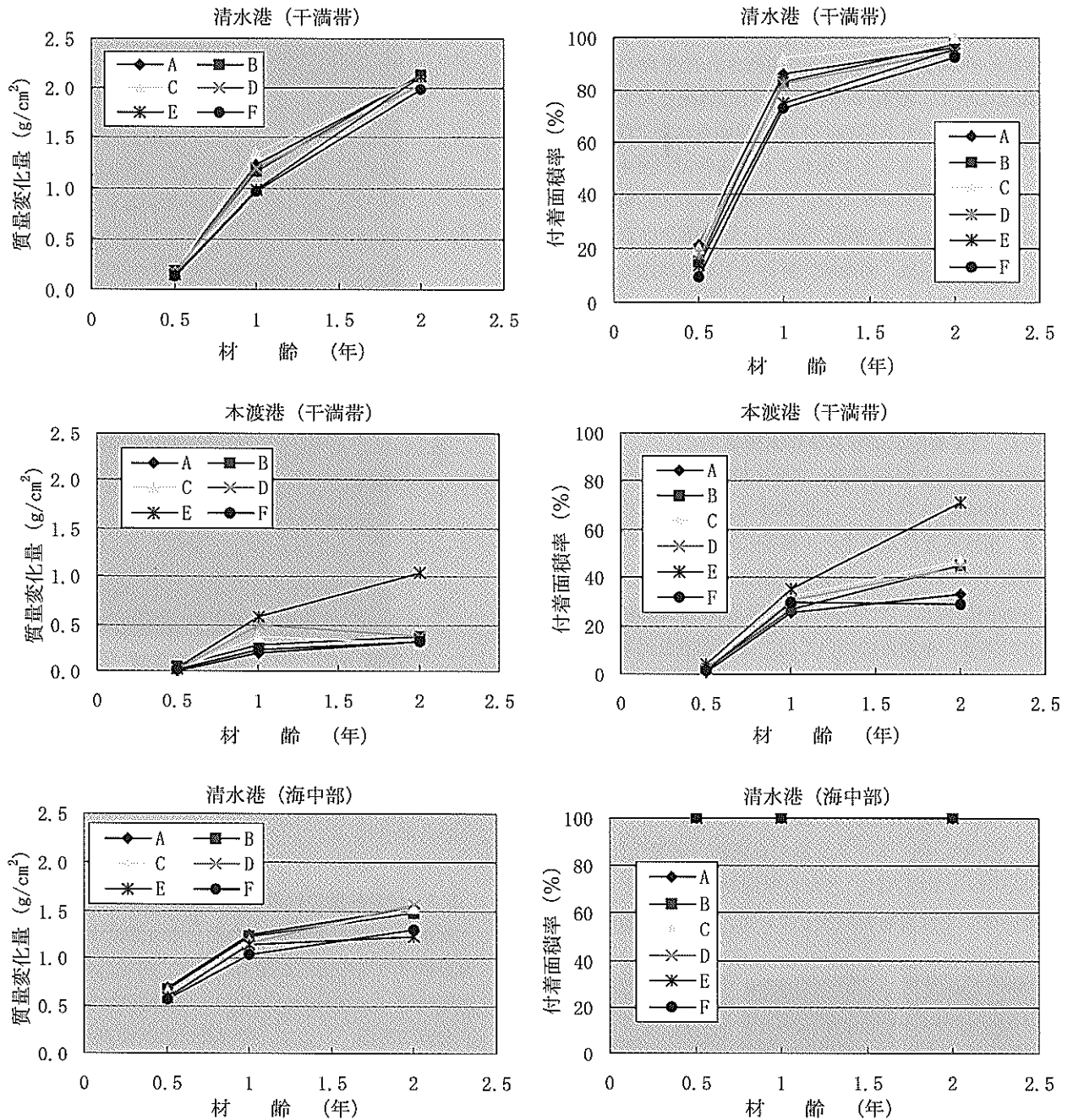


図-4 生物付着量及び付着面積率の経時変化

### 3.4 付着に及ぼす水質の影響

清水港、本渡港及び海水循環水槽の水質測定結果を図-5に示す。測定は、供試体暴露後、暴露期間6ヶ月（2000年6～7月）、1年（2001年1～2月）及び1年8ヶ月（2001年7月）時点で実施した。

海水の水質測定には、堀場製作所製マルチ水質モニタリングシステム（U-23T-10m）を使用した。センサとして、pHセンサ、溶存酸素センサの2種を用い、両センサによりpH、導電率、濁度、溶存酸素、水温、塩分濃度、全溶存固形物量、海水比重及び酸化還元電位の測定を行った。

各項目のもつ物理的意味は以下のとおり<sup>15)~17)</sup>である。

- ・水深（圧力）：海水の重要な物性を決める三大要素の一つ。測定空間の決定、測定した他データの評価に用いる。

- ・pH：水素イオン濃度。日本各地の港湾におけるpHの測定結果（39地点、1998年まとめ）<sup>18)</sup>によれば、その範囲は5.8～9.1であった。

- ・導電率：物質中における電流の流れ易さを示す指標。溶液中の全ての物質（塩分や鉱物、溶存ガスなど）の総量を示す。その概略値は、河海混合水で0.5S/m、沿岸海水で3.3S/m、海洋海水で4～5S/m程度。また、清浄海水で汚染海水よりも値が高い。

- ・濁度：海水の濁りの程度を表す指標。海水が濁り、濁度が増加すると、海中の植物プランクトンの光環境を悪化させる。植物プランクトンは食物連鎖の出発点であるため、生物に与える影響は甚大である。海水の濁りは主として植物プランクトン、その他の有機懸濁物（生物の分解細片など）、無機懸濁物（土砂など）、溶存有機物（黄色物質）に起因している。赤潮時には植物プランクトンが濁りの主成分になる。

- ・溶存酸素：水中に溶け込んでいる酸素濃度。河川や海域の自浄作用や魚類などの水棲生物にとって不可欠。温度が高いほど、また、汚染されているほど溶存酸素量は少なくなる。海水中の通常の値は0～9ml/l。沿岸域においては有機物汚染等の指標として用いられる。赤潮等が発生すると溶存酸素量は少なくなり、その場所の生物は酸素不足によりほぼ死滅する。

- ・水温：海水の重要な物性を決める三大要素の一つ。高温度ほど生物は早く成長する。また、フジツボ等の浮遊幼生期間も短くなる。

- ・塩分濃度：海水の重要な物性を決める三大要素の一つ。海水1kg中に含まれる溶解塩類のグラム数。外洋の生物は塩分濃度に敏感だが、今回対象としているフジツボ類やマガキは低塩分にも耐える。

- ・全溶存固形物量：溶液中の固形物量（NaClなど）を示す指標。

- ・海水比重：海水の比重。一般的な値は1.0243（20℃の場合）。

- ・酸化還元電位：溶液中に共存する酸化体( $M^{2+}$ )と還元体( $M^{(2-N)+}$ )の間の平衡状態によって定まる電位。

以上の物理的意味を踏まえて測定結果について見てみると、暴露期間6ヶ月時点（平成12年6～7月）において、本渡港での水質が良好でなく（濁度が高く、溶存酸素が低い）生物付着量が極端に少なかったことから、当時（平成12年6月～10月頃）有明海及び八代湾の広範囲で発生した赤潮の影響<sup>19)</sup>が試験結果に及んでいるものと考えられた。

暴露期間1年及び1年6ヶ月では、6ヶ月時点に比較して水質が同程度かさらに若干悪化する傾向にあることがわかる（導電率が高く、濁度及び溶存酸素は同程度）。文献<sup>15)~18)</sup>等から判断すると、赤潮の発生した本渡港においても測定値は通常の海水の範囲であるが、清水港に比べて水質が生物生息状況にとって好ましくないことは明白であり、赤潮が影響しているものと考えられる。

### 3.5 生物の付着志向性

本節では、生物の付着志向性について、暴露供試体の設置位置等外的要因が及ぼす影響について述べる。これに対し、コンクリートの材料及び配合等内的要因が及ぼす影響については4章で述べることとする。なお、本報告においては生物の付着性の傾向に対し、生物に主体をおいた場合には「志向性」と称し、材料あるいは構造物に主体をおいた場合には「容易性」と称することとする。本観察に用いた供試体は100×100×400mm（RC）で、A～F配合のひび割れを有するもの及び有しないもの各々3体ずつである。

図-6に観察結果の概略を示す。(1)は、供試体が面している方向における付着量の違いを示している。海側よりも岸壁側で付着量は多いが、これは、海側に比べて岸壁側では波浪が穏やかで、かつ日射が少ないため乾燥程度が小さく、付着機能及び生存機能の発達していない幼生にとって付着及び生存が容易なためと考えられる。また、陸側よりも沖側で付着量は若干多い傾向にあるが、これは、沖から浮遊してくる幼生が多いためと考えられる。さらに、沖側にある架台に設置した供試体の方が付着量が多い傾向にあり、これは、供試体一体の沖側—陸側の付着状況と同様の理由と考えられる。なお、東西南北の方位の影響は認められなかった。

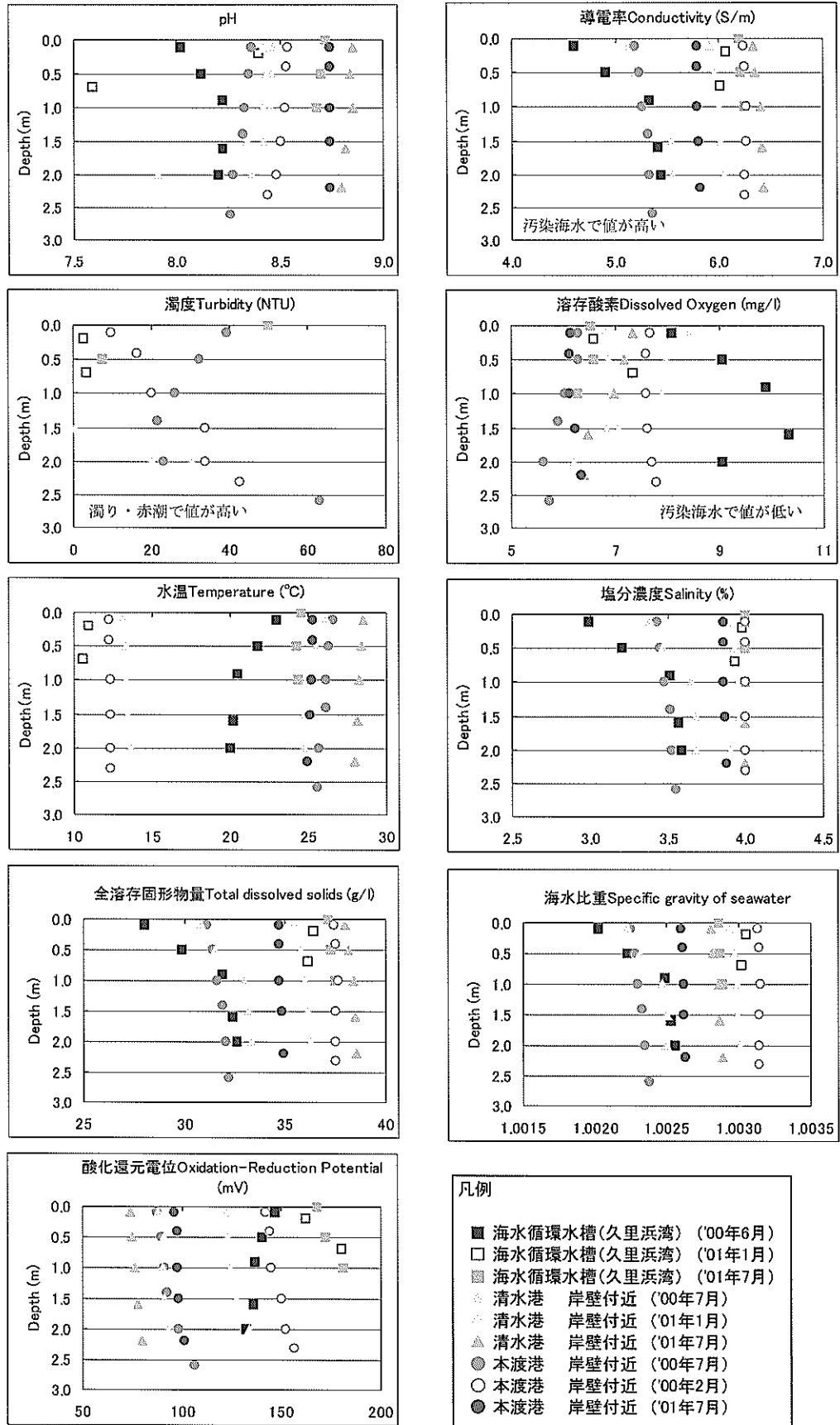
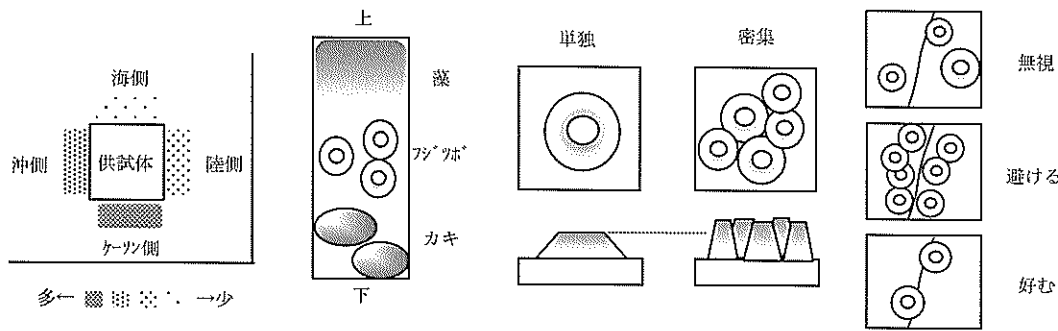


図-5 水質測定結果





(1) 供試体の面する方向の分布 (2) 供試体高さ方向の分布 (3) フジツボの成長方向 (4) ひび割れへの志向性

図-6 生物付着状況観察結果

(2)は、干満帯における供試体の高さ方向の付着生物の違いを示している。干満帯においては供試体高さで付着生物の種類が異なり、上部では藻、中部ではフジツボ類、下部ではカキ類が多く観察された。また、清水港では下方に向かって付着量が多くなるが、本渡港では特にそのような傾向はなく、上部の方で付着量が多い場合もあった。付着生物は、一般に生息する干満帯の範囲内でその乾湿や食餌生物の供給状態により付着場所を選択すると言われており、清水港では干満差が1.5mと小さいため付着生物の棲み分けが明瞭であるのに対し、本渡港では干満差が5.5mと大きいため棲み分けが不明瞭となり、供試体高さ方向における付着生物の種類及び付着量の差異が明確でなかったと考えられる。一方、海中部においては生物種類が異なる傾向は認められず、一様に生物が付着していた。これは、海中部では干満帯と異なり、海水及び日射の供給等の環境条件が一様であったためと考えられる。このように、生息する環境条件により、生物が生存に最も適した箇所を選択して付着している状況が観察された。

(3)には群生するフジツボの成長状況を示す。フジツボ一個体のサイズは、付着量が少ない場所の方が大きい傾向にあった。また、単独のフジツボは横方向に大きくなり、密集しているフジツボは高さ方向に成長していることが認められた。

供試体に人工的に導入したひび割れに対するフジツボの付着志向性を示したのが(4)である。ひび割れを避ける場合、ひび割れを覆う場合、ひび割れに沿う場合等様々であり、特にひび割れを選択あるいは忌避する状況は認められなかった。

また、付着の志向性として、特にフジツボ類は凹部を好む傾向が大きいことが認められた。すなわち、供試体表面に彫り込んだ配合の文字、供試体表面に発生した小さな孔、コンクリートと塩び版のシールの境界、供試体

の角、既に付着しているフジツボの上、仕切鉄筋の付近等、数センチオーダーの凹部を選択する傾向が認められた。既往の文献<sup>20)</sup>によればフジツボ類は付着初期には数ミリオーダーの凹凸を好むと言われており、これらの研究成果を総合して考えると、フジツボ類は付着初期から6ヶ月程度までの期間は、数十ミリ程度の凹凸を選択して付着及び成長する傾向があることが明らかとなった。

#### 4. 付着基盤の性状が海生生物付着に及ぼす影響に関する検討

本章では、海生生物の付着を促進する要因のうち、材料、配合及び供試体の表面形状等、付着基盤の内的要因が付着に及ぼす影響について述べる。また、実海洋環境下における暴露試験の他、生物付着の容易性に関する短期試験を基に、生物付着を促進させる付着基盤の材料、配合及び表面形状についての検討を行った。なお、ここで付着基盤とは、コンクリート、モルタル及びセメントペースト等、海生生物の付着対象となる物質を称している。

##### 4.1 実海洋環境下における暴露試験

###### (1) 材料及び配合の影響

検討対象には、生物付着観察用に作製した300×300×100mm供試体の、清水港及び本渡港干満帯における暴露期間1年8ヶ月時点の生物付着量を用いた。結果を図-7に示す。図-7より、本渡港における高強度混和材を用いたD、E配合を除いて、A～F配合間で生物付着量に顕著な差が認められないことから、高炉スラグ、フライアッシュ及び高強度混和材等の使用の効果は認められない結果となった。このような混和材を用いた配合が生物付着に有効であることは既往の研究<sup>21)</sup>で確認されており、本供試体において配合間の差異が認められない理由として

は、供試体作製後の気中養生期間が約3ヶ月と長かったため供試体表面が多少なりとも中性化し、混和材混入の主眼であるアルカリ度の差異が配合間で小さくなったためではないかと考えられる。

しかし、図-8に示すように、3.5節で付着の志向性についての検討に用いた100×100×400mm (RC) 供試体の暴露期間1年8ヶ月時点における付着量においては、配合間における差異が認められた。

すなわち、水結合材比が55%であるA, B, C配合をみると、結合材に普通ポルトランドセメントのみを使用し

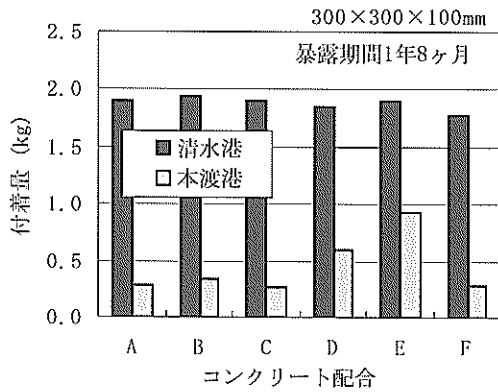


図-7 生物付着量測定結果 (300×300×100mm供試体)

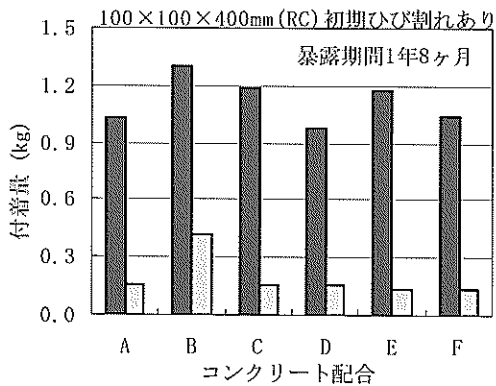
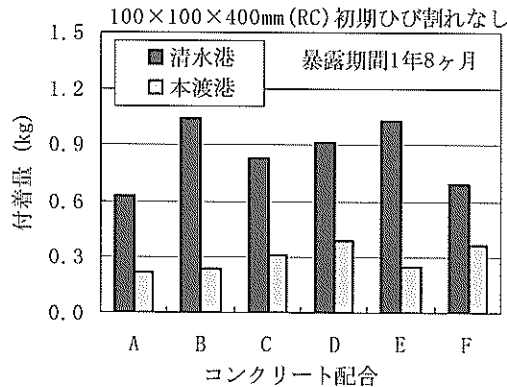


図-8 生物付着量測定結果 (100×100×400mm供試体)

たA配合の付着量が最も小さく、高炉スラグ微粉末を用いたB配合及びフライアッシュを用いたC配合では、その付着量は多くなっている。また、水結合材比が40%であるD, E, F配合においても、結合材に普通ポルトランドセメントのみを使用したD配合で付着量が少なく、混和材を用いたE, F配合で付着量は多くなる傾向にあった。この傾向は、初期ひび割れの有無に係わらず同様であった。これらの結果より、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、あるいは高強度混和材を混和材として用いてコンクリート中の細孔溶液のアルカリ度を低下させることは、海生生物の付着に効果があると考えられる。

アルカリ度の影響を明白にするため、コンクリート中の水酸化カルシウム量を要因として生物付着量との関係について整理したのが図-9である。なお、コンクリートのアルカリ度は、炭酸化がほとんど進んでいない暴露初期の時期をもって評価した。また、図-9に示す付着量は、本渡港での暴露期間6ヶ月時点での観察結果である。図-9より明らかなように、特に付着初期においてはコンクリート中の水酸化カルシウム量が少ないほど付着量が多く、アルカリ度の低いことが生物にとって付着しやすい環境であるものと考えられる。

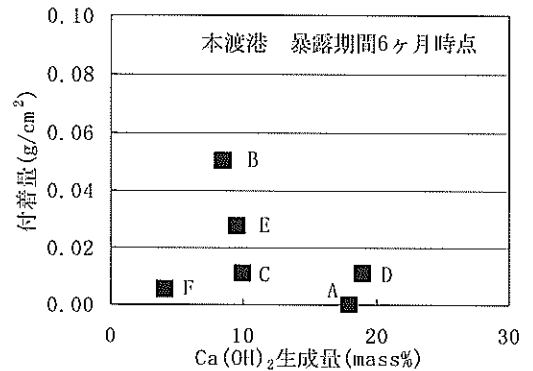


図-9 生物付着量とセメントペースト中の水酸化カルシウム量との関係

一方、鉱物質系混和材として酸化鉄、水酸化マグネシウム、及び水和熱抑制型膨張材を用いたG, I, K配合の効果を図-10で見ると、I及びK配合において、混和材を用いていないA~C配合に比べて生物付着量が多くなっていることが認められる。このような鉱物質系混和材に含まれる鉄分については、従来、水産、造船等の分野で生物が付着しやすいことが知られており<sup>22), 23)</sup>、これらの研究と一致する結果となった。

さらに、セメントにピーライトセメントを用いてコンクリートのアルカリ度をさらに低減させたL, M配合では、

炭酸化処理を行ったL配合においても、また、行わなかったM配合においても、混和材を用いていないA配合との付着量の差異は認められなかった。これは、基本配合であるA配合においても、また炭酸化処理を行わなかったM配合においても、気中養生中に表面部分が自然に炭酸化し、炭酸化処理を行ったL配合と供試体表面での炭酸化が同程度となったことが原因と考えられる。なお、L及びM配合では暴露期間6ヶ月までのデータしか得られていないため、同時期に暴露したA配合との比較を示した。

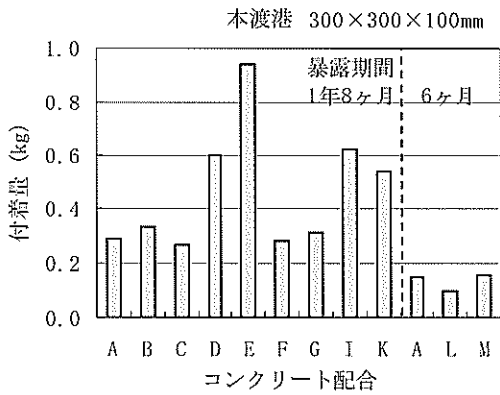


図-10 生物付着量測定結果 (300×300×100mm供試体)

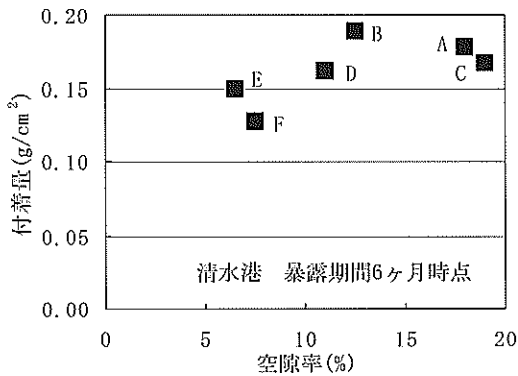


図-11 生物付着量とセメントペースト中の空隙量との関係

(2) 表面形状の影響

表面形状の違いが付着に及ぼす影響については既往の研究<sup>20)</sup>により知見が得られており、付着後6ヶ月程度までは50mm程度の凹凸が好まれることが明らかとなっている。本検討では全ての供試体について目視観察を行った結果、3.5節で述べたように暴露期間6ヶ月時点程度までは数センチオーダーの凹部を選択する傾向が認められた。

セメントペースト中の空隙率と付着量との関係を整理したのが図-11である。空隙量は、モルタル部分を用

いて水銀圧入法により測定した。なお、図中の付着量が0.10~0.20g/cm<sup>2</sup>は、付着面積率が10~20%程度の時期に相当する。図-11より、コンクリート中の空隙率が大きくなるほど付着量が多くなる傾向が認められる。フジツボは付着する際にタンパク質系の接着物質を分泌し、それをアンカーとして物体表面に付着することが知られている<sup>13)</sup>。そのため、接着物質がコンクリート表面に固定されやすい、すなわち空隙量が多いほど付着量が多くなると考えられる。

以上より、生物が付着及び成長しやすい条件として、付着初期においてはコンクリートのアルカリ度が低いこと、また、その後はコンクリート表面の空隙率が大きいこと、さらに付着が進んだ段階においては、コンクリート表面に数十ミリ程度の凹凸が存在することが効果的であることが明らかとなった。

4.2 バイオフィーム着生試験

コンクリートの材料、配合及び表面形状の違いによる生物付着の容易性については4.1節において述べたとおりであるが、フジツボ、カキといった大型の付着生物が目視で確認できる程度に成長するまでは数ヶ月を必要とする。そこで、短期間で付着の容易性の違いを確認するための一手法として、バイオフィーム着生試験を実施した。

バイオフィームは主に海水中の植物プランクトンで構成され、着生は1日~14日程度で確認することができる。バイオフィームは、着生後それを食餌とする小型及び大型の生物が寄ってくるため、その後の大型生物の種類等を支配するといわれている。これより、バイオフィームの着生性状を把握することにより、本研究で対象としているフジツボ等の付着をある程度推察できるものと考えられる。

着生試験用にはA~F配合の20×20×80mmモルタル供試体を作製し、試験に供する前に14日間の水中養生を行った。この供試体の長軸方向中央にφ3mmの孔をあけて紐を通し、他の供試体と接しないよう写真-5に示す要領でコンテナに設置し、久里浜湾海中部に暴露した。この際、着生に及ぼす供試体設置位置の影響を排除するため、コンテナには異なる配合の供試体をランダムに配置した。暴露後、1日、2日、3日、7日、14日目、及び23日目に供試体を引上げ、他供試体と面していない側面を光学顕微鏡(キーエンス社製高精細マイクロスコープVH-6300)により観察した。

各配合及び各暴露期間において観察された代表的な生物の一例を付録Aに示す。文献<sup>20)</sup>によれば、付着生物

の種類は主として珪藻類、ゴカイ類、フジツボ類等であり、多様な種類の生物が暴露後早い時期から付着していることが認められる。なお、顕微鏡の倍率は主として100～150倍である。

付録表 A.1 では、付着生物の種類が異なるため各配合間の付着の容易性が不明である。しかし、暴露7日目頃よりフジツボの付着が明白に観察されるようになったため、フジツボの個体数をもって付着容易性の指標とすることにした。結果を図-12 に示す。図-12 より明らかなように、久里浜湾においてフジツボは、水セメント比が小さい配合 (D, E, F 配合) よりも大きい配合 (A, B, C 配合) を、また、水セメント比が同じ場合には混和材を使用した配合 (B, C, F 配合等) を好む傾向が認められた。これは、4.1 節で述べた結果と同様であり、これらの配合ではコンクリート表面のアルカリ度が低く、生物にとって生存しやすい環境であったため付着数が多くなったと考えられる。

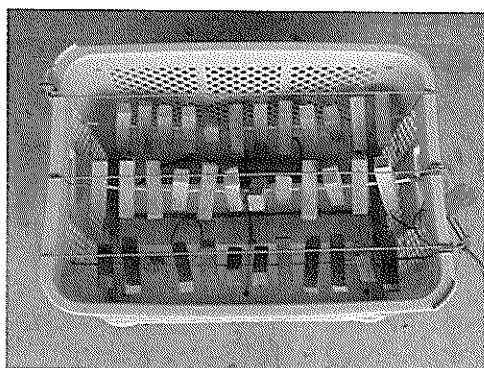


写真-5 バイオフィーム着生試験供試体設置状況

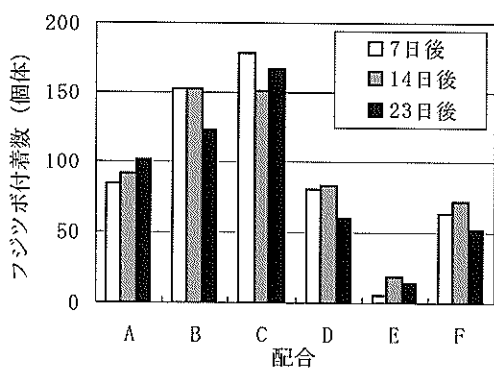


図-12 バイオフィーム着生試験結果 (フジツボ付着数)

### 4.3 キプリス幼生付着試験

4.2節で述べたバイオフィーム着生試験と同様の目的で、キプリス幼生付着試験を実施した。キプリス幼生は、図-13<sup>3)</sup>に示すようにフジツボの成長過程において付着場所を決定する時期の幼生であり、付着の志向性を調べ

るために利用される重要な幼生である。試験は、A～F配合のセメントペースト供試体 (40×40×10mm) を作製し、7日間水中養生した後、キプリス幼生の生息する水槽に入れ、付着数を計測する試験を二種類行った。

試験Ⅰは一つの水槽に一配合の供試体を入れ、そこにキプリス幼生30個体を入れた。その後、暗所に静置し24時間後及び48時間後に個体の生存状況の観察を行った。試験Ⅱは、一つの水槽に二配合の供試体を入れ、そこにキプリス幼生50個体を入れた。その後、1日後、2日後、3日後にキプリス幼生及び水槽中の海水をそれぞれ新しいものと取り替えながら観察を行い、3日後以降は10日間暗所で静置した後、最終的な個体の生存状況の観察を行った。

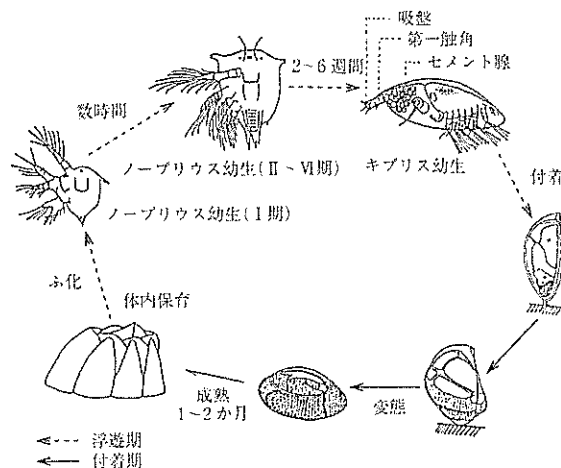


図-13 フジツボの成長過程<sup>3)</sup>

試験結果の概要を表-5に示す。どちらの試験方法においても、キプリス幼生は試験終了時にはほとんどの個体が死滅していた。これは、試験期間中に観察された白色の溶出物、すなわち、セメントペースト供試体から溶出した強アルカリ成分の影響と考えられる。

しかし、配合間における付着容易性の差異は認められるため、試験Ⅰにおいては試験開始48時間後の付着個体数、試験Ⅱにおいては試験開始3日後の付着個体数をもって配合間比較を行った。結果を図-14に示す。図-14に明らかなように混和材としてフライアッシュを用いた配合 (C, F 配合) で、付着が良い傾向が認められる。また、試験Ⅰでは、混和材を用いないA配合において個体は全て死滅しており、また、試験Ⅱにおいても、A配合を含む配合の組合せで個体が死滅する割合が多かった。これは、混和材を用いないA配合では、混和材を用いた配合に比べて単位セメント量が多いため、アルカリ度が高かったためと考えられる。これらの結果は、4.1節で述べた実海洋環境下における暴露試験結果及び4.2節で

表-5(1) キプリス幼生付着試験結果 (試験 I)

配合	24 時間後	48 時間後
A	約半数が死亡	全滅
B	死亡数は少ないが、これから死亡する個体ばかりだった	容器に1個体付着していた
C		容器に3個体付着していた 1個体が浮遊していた 死亡数が二番目に少なかった
D		容器に1個体付着していた
E		容器に1個体付着していた
F		容器に2個体付着していた 死亡数が一番少なかった
		脚が動いているものが多かった。 泳いではいない

表-5(2) キプリス幼生付着試験結果 (試験 II)

配合の組合せ	1 日後	2 日後	3 日後	10 日後
A-B	ほとんど死亡	健全	容器に3個体付着	全滅
B-C	ほとんど死亡	健全	容器に12個体付着 Cに2個体付着	全滅
C-A	ほとんど死亡	健全	容器に6個体付着	全滅

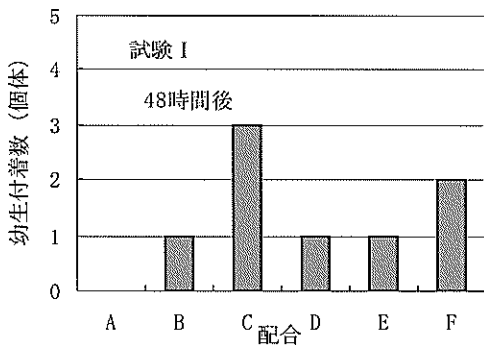


図-14(1) キプリス幼生付着試験結果 (試験 I)

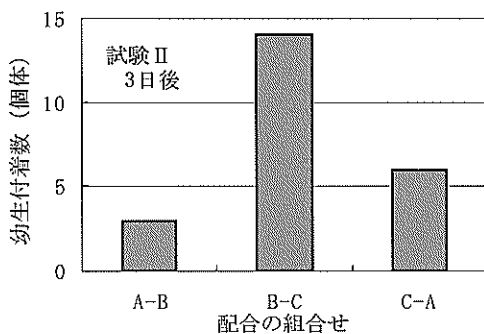


図-14(2) キプリス幼生付着試験結果 (試験 II)

述べたバイオフィーム着生試験結果とも合致するものであり、生物付着の容易性にコンクリートのアルカリ度が大きく影響を及ぼしていることを明らかにした。

#### 4.4 生物付着を促進させる材料、配合及び表面形状の提案

前節までに述べた暴露試験及び室内試験の結果、生物の付着及び成長を促進させる条件として、以下の要因が効果的であると考えられる。

材料については、高炉スラグやフライアッシュ、高強度混和材等、一般的に使用されている混和材を用いてコンクリートのアルカリ度を低減させることが付着初期には有効である。また、その他の特殊な混和材として、酸化鉄、水酸化マグネシウム、膨張材等、鉱物質を含有する混和材はさらに生物付着を促進させると考えられる。さらに、アルカリ度の低いピーライトセメント等を用いることも有効と考えられる。その他、炭酸化処理を行ってコンクリート表面のアルカリ度を低減させることも効果的と考えられる。

配合については、コンクリート表面の空隙率を大きくすることが、コンクリートのアルカリ度の影響を受ける初期付着から進んだ段階での付着促進に効果的である。

表面形状としては、コンクリート表面に数十ミリ程度の凹凸を形成することが、付着初期から数ヶ月間は効果的である。

付着生物は、生物の種類によっては既に付着した生物の周辺を好んで付着する性質を有していることが知られており、このような観点から、初期の付着を促進させることは長期的な付着をも誘引する有効な手段となると考えられる。



### 5. 海生生物による鉄筋の腐食抑制に関する検討

本章では、コンクリート表面に付着した海生生物によるコンクリート中の鉄筋の腐食抑制について検討を行う。鉄筋腐食の進行に関わる測定値として、暴露試験においては自然電位、鉄筋腐食状況、及び塩化物イオン浸透量を取り上げ、また、室内促進試験においては塩化物イオン拡散係数、酸素拡散係数、及び鉄筋腐食速度を取り上げ、これらの測定値と生物付着量との関係について整理した。室内促進試験を実施した理由は、実海洋環境下における暴露試験では暴露期間1年8ヶ月と短かったため明瞭な鉄筋腐食が生じておらず、生物付着が鉄筋腐食抑制に及ぼす影響を明らかにすることができなかつたためであり、また、生物付着によるコンクリート中の物質浸透抑制効果を定量的に評価するためである。大型RC梁供試体を用いた曲げ載荷試験を実施し、生物付着が部材の力学性能に及ぼす影響についても検討した。

#### 5.1 自然電位

自然電位の測定は、大型RC梁供試体（200×300×2400mm）及び小型RC供試体（100×100×400mm）を対象として、暴露期間中、実海洋環境下では原則として6ヶ月に一度、港空研海水循環水槽では3ヶ月に一度実施した。測定には鉄筋腐食診断器SRI-CM-II（四国総合研究所製）を用いた。

##### (1) 大型RC梁供試体の自然電位

測定対象とした大型RC梁供試体の一覧を表-6に示す。供試体は、かぶり50mmで人工的な初期ひび割れを導入しない基本供試体の他、スリットにより初期ひび割れを作製したもの、かぶりを小さく（25mm）したもの、及び直

流電流を印加することにより主筋を強制的に腐食させたものとした。なお、供試体の寸法及び配筋は5.7節（図-32）に示すとおりである。

大型RC梁供試体の測定結果を表-6に、自然電位による鉄筋腐食の評価基準を表-7に示す。なお、測定は供試体が十分吸水しているように満潮時から潮が引いて供試体上面が海面に露出した直後を選び、参照電極（海水塩化銀電極）を供試体近傍の海中に吊り下げて行った。測定結果は主筋3本の平均値であり、測定時の温度補正を行ったものである。

表-6に示す自然電位の測定結果によれば、海水循環水槽に暴露した供試体のうち、ひび割れを有する供試体は測定初期から自然電位が非常に小さい値を示しており、鉄筋腐食が進行しているためとは考え難い。そこで、自然電位の絶対値ではなく変化量として表したのが図-15である。暴露開始時期が異なるため、本渡港に暴露した供試体、清水港に暴露した供試体、及び両者に対して生物が付着しない場合の比較のため海水循環水槽に暴露した供試体のうち、暴露開始時期が同一のものを同じ図上に示した。

図-15によれば、本渡港に暴露した供試体のうち、ひび割れを有するもの及びかぶりが小さいもの、清水港に暴露した供試体のうち暴露前に電食を行ったもので自然電位が卑な方向に変化しており、鉄筋腐食が進行していると推察される。これらの供試体の一部からは暴露試験終了後、内部鉄筋を採取しその腐食状況等についての確認を行った。結果については5.7章で詳述する。

一方、初期ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響について検討するため、初期ひび割れを有する供試体一体を選び、ひび割れ近傍とそれ以外の箇所について主筋の自然電

表-6 自然電位測定結果（大型RC梁供試体 vs海水塩化銀電極 単位:mV）

供試体No.	暴露場所	仕様	初期	暴露1ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	12ヶ月	15ヶ月	18ヶ月	20ヶ月
H1	本渡港	基本	-59.1*	-	-	-250.0	-	-185.5	-	-261.7	-283.0
H2	本渡港	スリット0.1mm		-	-	-142.6	-	-78.0	-	-121.3	-105.0
H3	本渡港	スリット0.3mm		-	-	-120.4	-	-214.1	-	-311.7	-315.0
H4	本渡港	かぶり小		-	-	-206.4	-	-219.5	-	-293.3	-311.0
K1	循環水槽	基本	-526.0 -573.1	-	-86.1	-87.7	-35.0	-10.0	-25.3	-75.8	-8.9
K2	循環水槽	スリット0.1mm		-	-580.3	-499.9	-527.2	-561.7	-582.2	-504.2	-
K3	循環水槽	スリット0.3mm		-	-557.6	-491.9	-513.5	-544.4	-573.2	-467.5	-
S1	清水港	基本	-246.9* -56.7* -246.9*	-	-	-182.9	-	-	-	-	-
S2	清水港	スリット0.3mm		-	-	-230.3	-	-	-	-	-
S3	清水港	電食軽度		-	-494.3	-570.1	-	-	-	-	-
S4	清水港	電食重度		-	-401.7	-575.5	-	-	-	-	-
K4	循環水槽	基本	-56.7*	-332.3	-326.2	-200.5	-	-	-	-	-
K5	循環水槽	電食軽度		-64.1	-110.7	-69.1	-	-	-	-	-

\* 初期値測定はK1, K4, K5供試体を対象として実施

表-7 自然電位による腐食評価基準 (ASTM C 876)

電位 (vs海水塩化銀電極)	腐食の確率
-80mVより貴	90%以上腐食なし
-80~-230mV	不確定
-230mVより卑	90%以上腐食あり

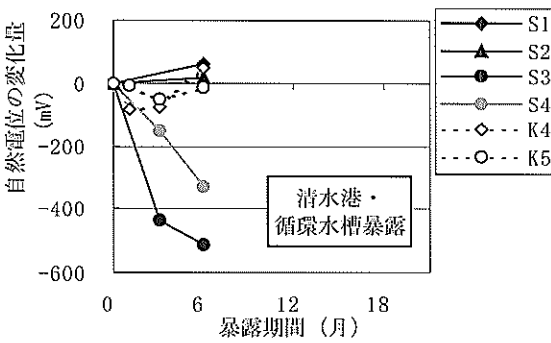
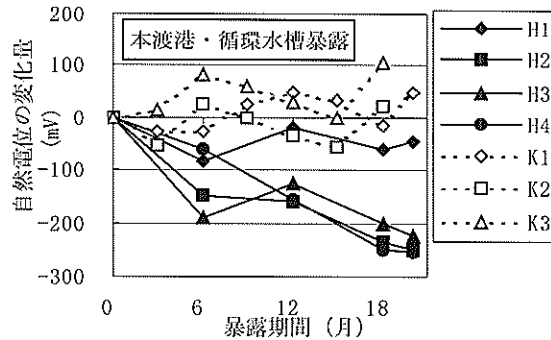


図-15 自然電位の経時変化

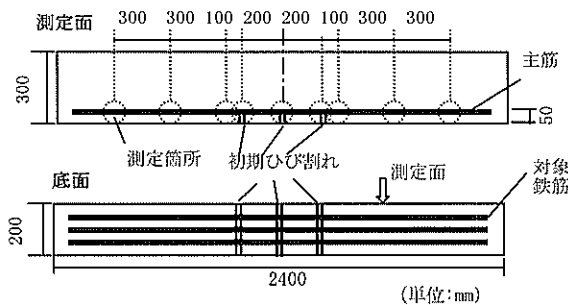


図-16 自然電位測定位置

位の測定を行った。対象とする供試体は、生物が付着していること及びひび割れ幅が大きいことから、本渡港に暴露したひび割れ幅0.3mmの供試体 (H3) とした。測定は供試体の海側暴露面を対象とし、長手方向に約300mm間隔の図-16に示す位置で実施した。測定は、測定箇所近傍の電位を測定できるよう、生物を除去した後、接触型のセンサを用いて行った。

測定結果を図-17に示す。図-17より明らかなように、ひび割れ位置では自然電位の値が周囲に比べて卑にな

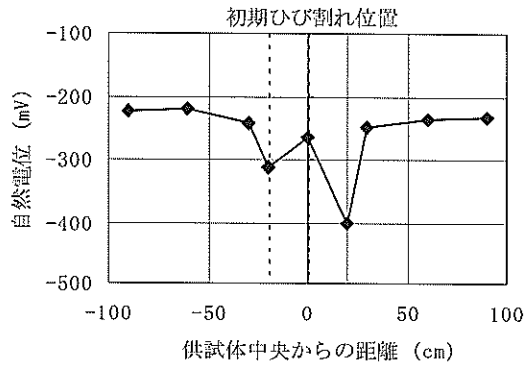


図-17 自然電位測定結果 (初期ひび割れの影響)

ることが認められ、ひび割れの存在が鉄筋の性状に影響を及ぼしていることが確認された。

(2) 大型RC梁供試体の生物付着状況

大型RC梁供試体の生物付着状況の一例を付録Bに示す。付録写真B.1には、表-6に示す全供試体のうち、本渡港及び清水港に暴露した供試体の長手方向4面を示した。

本渡港に暴露した供試体ではフジツボ類及びカキ類が多数付着しているが、清水港に暴露した供試体では付着生物は非常に少なく、生物付着が自然電位の測定結果に及ぼす影響については不明であった。清水港に暴露した供試体の生物付着量が少ない理由は、本渡港での暴露期間が1年8ヶ月であるのに対し、清水港では7ヶ月と短いためと考えられる。なお、海水循環水槽に暴露した供試体の表面状況も比較のため示した。

(3) 小型RC供試体の自然電位

清水港、本渡港及び海水循環水槽に暴露した小型RC供試体の自然電位測定結果を図-18に示す。測定結果は供試体3体の平均値である。全配合とも、暴露開始から暴露期間6ヶ月に至るまでに自然電位が大きく卑に移行している。A、C及びD配合の一部ではその後貴に移行しているが、全体的には暴露期間1年8ヶ月まで横ばい状態が続いていることから、暴露期間6ヶ月以降は鉄筋腐食は進行していないと推定された。これらの供試体の一部について内部鉄筋の腐食状況を確認したところ、腐食は生じていなかった。鉄筋腐食状況の詳細については5.2節で述べる。

(4) 小型RC供試体の生物付着状況

小型RC供試体の生物付着状況の一例を付録写真B.2に示す。写真は清水港に1年8ヶ月暴露した供試体のうち、初期ひび割れを有するもの及び有しないもの1体ずつとした。供試体観察結果によると、清水港に暴露したもので付着量が多く、本渡港に暴露したもので付着量は少なかった。配合及び初期ひび割れの有無による差異は認

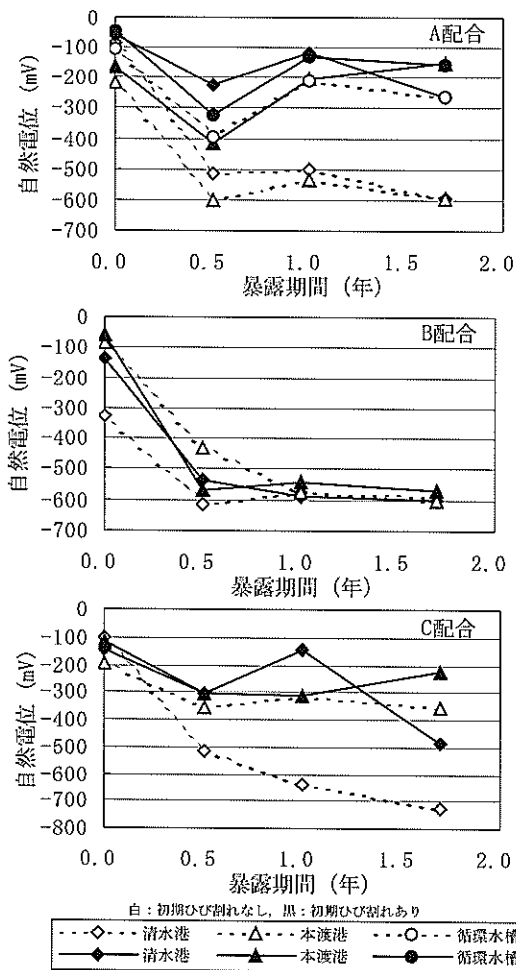


図-18(1) 小型RC供試体の自然電位測定結果 (A, B, C配合)

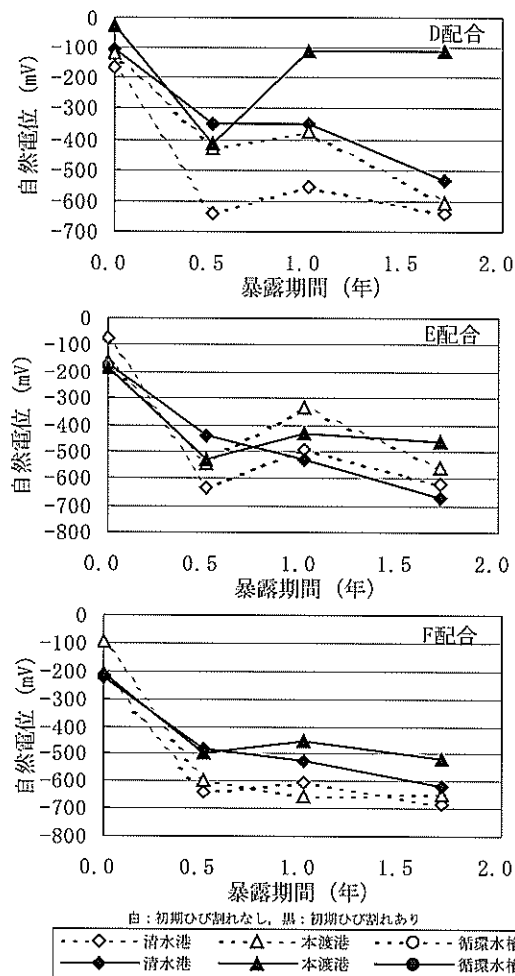


図-18(2) 小型RC供試体の自然電位測定結果 (D, E, F配合)

められず、大型RC梁供試体同様、生物付着量が自然電位の測定結果に及ぼす影響については不明であった。

### 5.2 鉄筋腐食状況

鉄筋腐食状況を確認するため、大型RC梁供試体及び小型RC供試体の一部から内部鉄筋を採取して目視による観察を行った。大型RC梁供試体では一部の供試体を用いて曲げ載荷試験を実施しており、鉄筋は載荷試験後の供試体から主筋3本を採取した。これらの鉄筋の腐食状況については、曲げ載荷試験について述べる5.7節で詳述する。

小型RC供試体では、自然電位が最も卑であった供試体を選び、これを割裂して内部鉄筋を取り出した。用いた供試体は清水港に1年8ヶ月暴露したE配合の初期ひび割れを有するもので、割裂前の自然電位は $-820\text{mV}$  (vs海水塩化銀電極)であった。

供試体割裂後のコンクリート内部及び鉄筋の状況を

写真-6に示す。コンクリート表面付近には変色部分が認められるが、鉄筋腐食は全く生じていないことが明らかである。鉄筋中央には、初期に導入したひび割れに接していた位置で白線状に生成物が認められ、初期ひび割れが自己癒着していた可能性も考えられる。これより、小型RC供試体では他の供試体においても内部鉄筋の腐食は生じていないものと推定され、生物付着量が鉄筋腐食に及ぼす影響を明らかとすることはできなかった。

### 5.3 塩化物イオン含有量

塩化物イオン含有量の測定は、 $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ 及び $100 \times 100 \times 200\text{mm}$ 供試体を用いて、暴露期間中、実海洋環境下では原則として6ヶ月に一度、海水循環水槽では1年に一度実施した。

測定はJCI-SC4<sup>25)</sup>に準拠して行った。測定のための粉末試料採取にあたっては、まず、供試体切断面に硝酸銀溶液を噴霧して白色に変色する領域から塩化物イオン

浸透領域を概略確認した。その後、φ12mmのドリルにより穿孔して深さ5mmごとに粉末試料を採取した。この際、穿孔は1供試体につき9点行い、深さごとに試料を合わせて平均化した試料を用いて試験を実施した。塩化物イオン含有量の測定にあたっては、採取した試料の最深部の塩化物イオン含有量が高い値を示している場合には、値が0に近づくまで試料採取及び試験を繰り返し、塩化物イオンの浸透した全領域において測定を実施した。

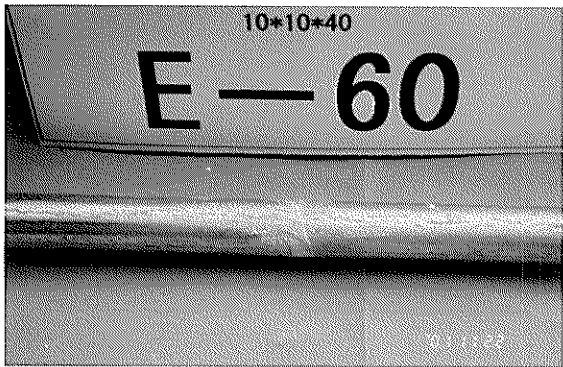
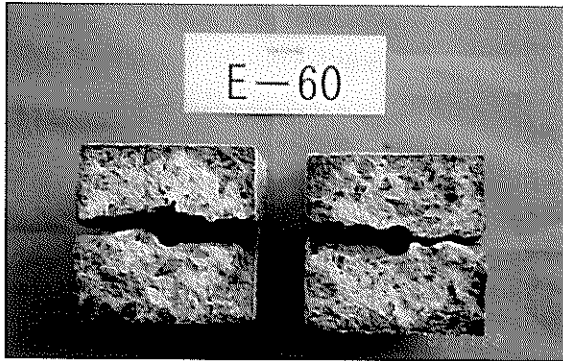


写真-6 小型RC供試体のコンクリート内部及び鉄筋状況（中央の白線は初期ひび割れ位置）

暴露期間1年8ヶ月における測定結果を暴露場所別に図-19に示す。干満帯での測定結果を比較すると、全配合とも塩化物イオン量は本渡港で最も多く、清水港、海水循環水槽の順で少なかった。3.3節で述べたように、本渡港では清水港に比べて生物付着量が少なく、このため塩化物イオン浸透の抑制効果が小さく、塩化物イオン含有量が多くなったものと推定される。また、清水港で、干満帯と海中部とを比較すると、ほぼ全配合で海中部における測定値が小さくなっており、海中部では乾湿繰返しによる塩化物イオンの濃縮等が起こりにくいため、浸透量が小さくなったと考えられる。これらに対し、生物付着のない海水循環水槽において塩化物イオン量が少ない理由は、実海洋環境に比べて干潮時間が短く乾湿繰返しの影響が小さいためと考えられる。

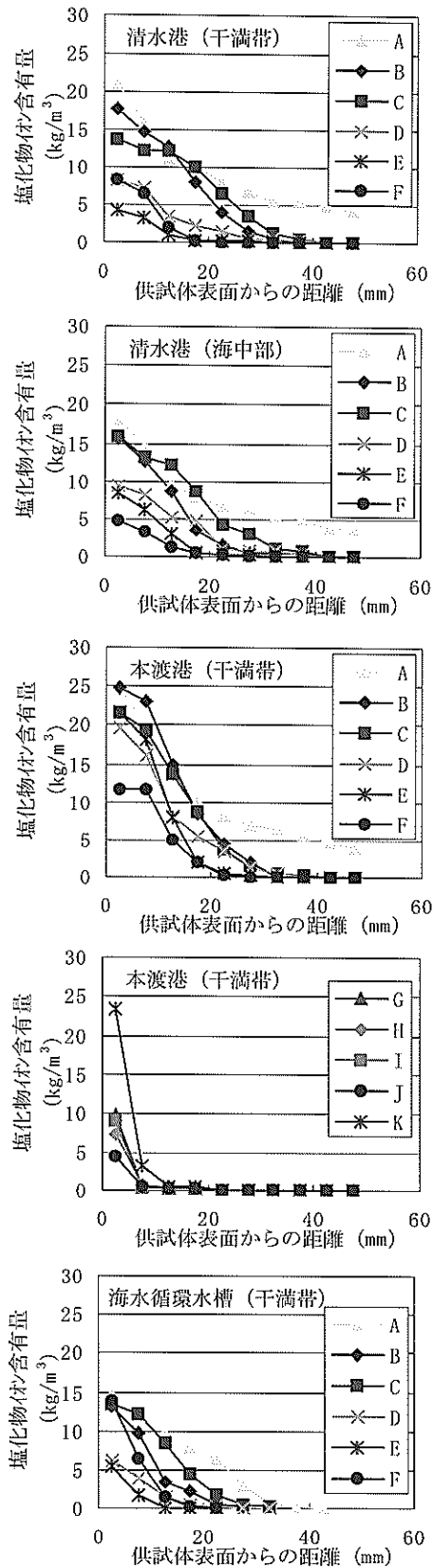


図-19 塩化物イオン含有量測定結果

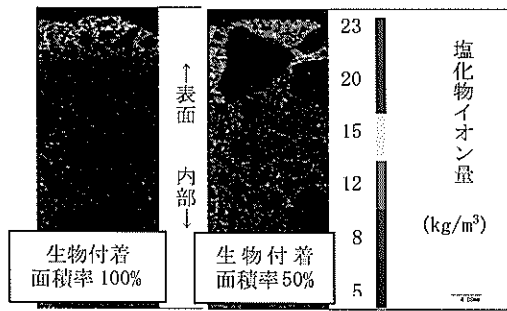


写真-7 塩化物イオン浸透状況

配合別に見てみると、各暴露場所とも水結合材比55%のA, B, C配合の方が、水結合材比40%のD, E, F配合よりも塩化物イオン量は大きい値を示していた。また、本渡港干満帯のみに暴露したG~K配合では、G~J配合と同じ水結合材比であるD~F配合、及びK配合と同じ水結合材比であるA~C配合に比べて塩化物イオン量は非常に小さい値を示した。G~K配合には鉱物質系の混和材を用いており、コンクリート組織が緻密であったため塩化物イオンの浸透を抑制したと考えられる。

一方、付着生物による塩化物イオン浸透の抑制効果を視覚的に示す例として、暴露期間6ヶ月時点での塩化物イオン浸透状況のEPMA写真を写真-7に示す。写真は清水港干満帯に1年間暴露したE配合供試体の高さ方向の断面を示している。写真-7に明らかのように、海水に接している供試体表面部分で塩化物イオン含有量が高く、供試体内部でその値は小さくなっている。この写真においても、生物が付着している場合には塩化物イオン含有量が供試体表面で特に小さく、生物によって塩化物イオンの浸透が抑制されていることが明らかとなった。

#### 5.4 塩化物イオン拡散係数

前節までに述べたように、暴露試験においては自然電位及び鉄筋腐食に及ぼす生物付着量の影響は不明であった。これは、1年8ヶ月までの暴露試験ではコンクリート内部の鉄筋腐食が生じていないことが原因と考えられた。また塩化物イオン浸透量に対しては生物付着効果が認められるが、その効果の定量的な評価は難しい。そこで、生物付着による塩化物イオン浸透抑制効果を定量的に評価することを目的として電気泳動試験<sup>29)</sup>を実施した。

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は拡散現象によるが、濃度勾配を駆動力とする拡散現象は長期間に亘って起こるため試験期間には長時間を必要とする。電気泳動試験は電気力によりイオンを強制的に移動させ

るため、比較的短期間に拡散係数を推定でき、かつ再現性に優れているという利点を有している。試験装置の概要を図-20に示す。アノード側にはコンクリート中の細孔溶液を模したCa(OH)<sub>2</sub>飽和水溶液を、カソード側には海水を模したNaCl 5%溶液を用い、両セル間に15Vの電圧を与えた。試験片は、暴露試験に用いた小型RC供試体(100×100×400mm)から、図-21に示すように生物付着層の影響を評価できるような方向に厚さ約30mmで切り出し、生物付着面をカソード側セルに向けた。この際、試験片は付着面積率の多少により、付着が多い試験片及び付着が少ない試験片の二種類に大別した。電気泳動によって、カソード側セルからコンクリート試験片を通してアノード側セルへ移動した塩化物イオン量を電位差滴定法により測定し、その経時変化より式(1)<sup>27)</sup>を用いて塩化物イオン拡散係数を算出した。

$$D_{cl} = \left( \frac{k \cdot T}{e \cdot Z_{cl}} \right) \cdot u_{cl} \quad (1)$$

ここに、 $D_{cl}$ : 拡散係数(cm<sup>2</sup>/s),  $u_{cl}$ : 電気的移動度(cm<sup>2</sup>/s/V),  
 $k$ : ボルツマン定数(J/K),  $T$ : 絶対温度(K),  $e$ : 電気素量(C),  $Z_{cl}$ : イオン価数

$$u_{cl} = - \frac{J_{cl}}{C_{cl}} \cdot \frac{1}{d\phi/dx}$$

$J_{cl}$ : 物質通過量(mol/cm<sup>2</sup>/s),  $C_{cl}$ : 溶液濃度,  $d\phi/dx$ : 供試体にかかる電位勾配

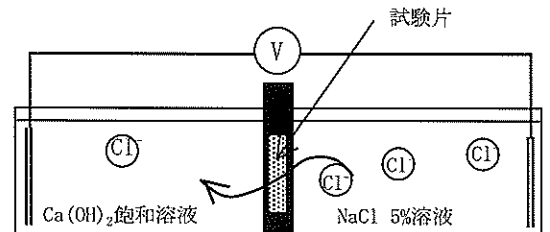


図-20 電気泳動試験装置の概略

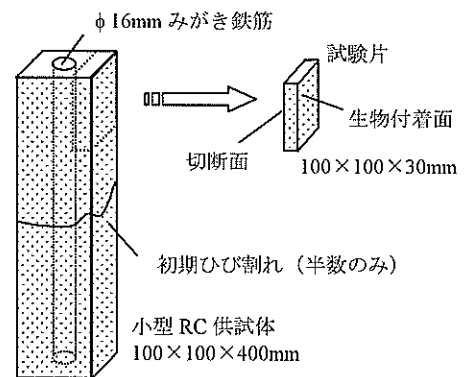


図-21 電気泳動試験用試験片作製状況



試験結果より求めた塩化物イオン拡散係数を図-22に示す。拡散係数は同一の配合でもその値が異なり、生物付着量が少ない場合にはその値が概して大きく、生物付着量が多い場合にはその値が小さいことが認められた。なお、生物付着率0%の場合の拡散係数は、暴露期間6ヶ月時点における塩化物イオン浸透量の測定結果(5.3節)から算出した。

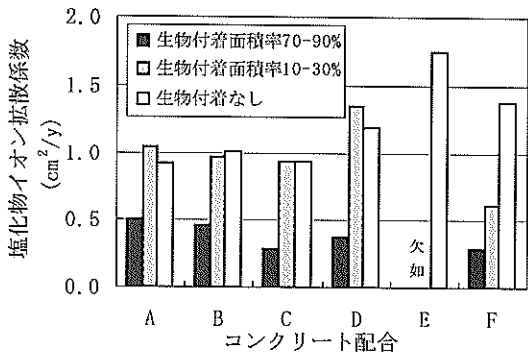


図-22 塩化物イオン拡散係数算出結果

図-23には、塩化物イオン拡散係数と生物付着面積率との関係を示す。生物付着面積率が大きくなるほど塩化物イオン拡散係数は小さくなる傾向を示しており、付着層により塩化物イオンの浸透が抑制されている状況が明白であった。特に生物付着量が70%程度以上になるとその低減効果が顕著に現れた。

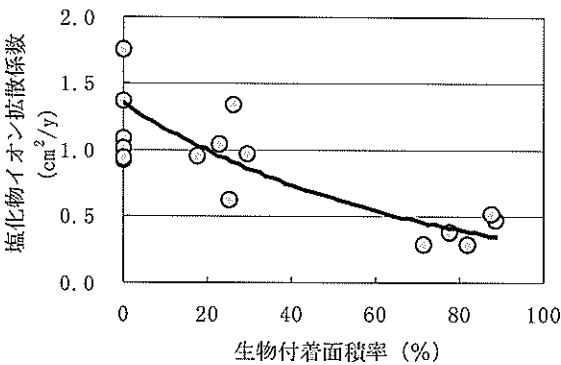


図-23 塩化物イオン拡散に及ぼす生物付着の効果

### 5.5 酸素拡散係数

5.4節同様、生物付着効果の定量的評価を目的として酸素拡散に関する促進試験を実施した。

鉄筋の腐食条件の一つとして十分な酸素の供給があり、鉄筋表面の不動態が破壊された後は、鉄筋への酸素供給量が多いほど腐食も速く進行すると考えられる。そこで、鉄筋への酸素供給量を推定するための促進試験と

して定電位ステップ試験<sup>23)</sup>を行った。試験装置の概要を図-24に示す。試験には小型RC供試体(100×100×400mm)をそのまま用い、海水を満たした容器の中に供試体を静置した状態で、鉄筋の電位を参照電極(海水塩化銀電極)に対して-1000mVに保持し、鉄筋と対極(ステンレス鋼板)間を流れる電流を計測した。

図-25に定電位ステップ試験の測定結果の一例を示す。ここに示すように、電流は時間の経過とともに減少し一定値に収束する。この電流値は鉄筋への酸素供給量に支配され、鉄筋への酸素供給量が多いほど流れる電流は大きくなる。本試験では電位保持時間を5時間とし、一定値に収束した電流値を電流密度に換算し、さらに式(2)<sup>29)</sup>を用いて酸素拡散係数を算出した。

$$D_o = \delta \cdot \left( \frac{I}{n \cdot A \cdot F} / C_b \right) \quad (2)$$

ここに、 $D_o$ :酸素拡散係数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $\delta$ :かぶり(cm)、 $I$ :限界電流(A)、 $n$ :原子価、 $A$ :電極面積( $\text{cm}^2$ )、 $F$ :ファラデー定数( $\text{C/mol}$ )、 $C_b$ :酸素濃度( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )

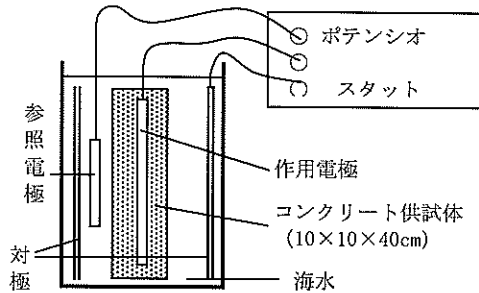


図-24 定電位ステップ試験装置概要

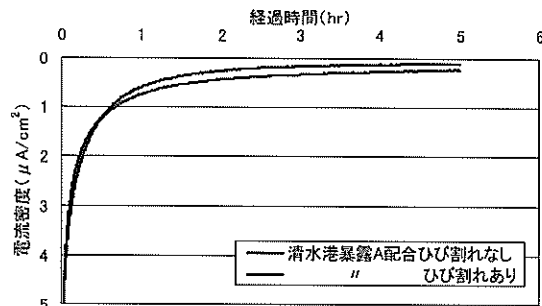


図-25 定電位ステップ試験測定結果例

試験結果より求めた酸素拡散係数の算出結果を図-26に示す。初期ひび割れの有無による差が明確に現れており、初期ひび割れのある供試体では酸素拡散係数が大きくなっている。

また、配合別に見た場合、混和材を用いていないA及

びD配合で、暴露場所すなわち生物付着量の影響が大きく現れる傾向にあった。混和材を用いコンクリート自体の組織が比較的緻密なB, C, E及びF配合では、生物付着層による酸素浸透抑制効果が現れにくく、相対的に酸素拡散係数の差が小さくなると考えられる。図-27に酸素拡散係数と生物付着量との関係を示す。生物付着量が多くなるほど酸素拡散係数は小さくなる傾向を示しており、塩化物イオン同様、生物付着層はコンクリート中への酸素拡散の抑制効果も有していると考えられる。

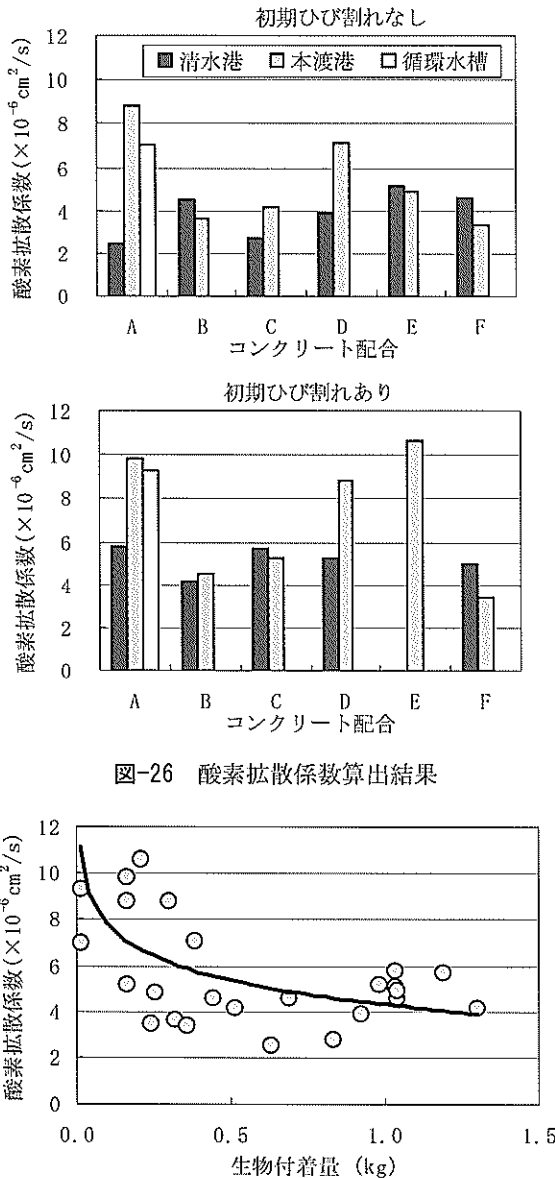


図-27 酸素拡散係数に及ぼす生物付着の効果

### 5.6 鉄筋腐食速度

5.4節及び5.5節同様、生物付着効果の定量的評価を目的として鉄筋腐食速度に関する促進試験を実施した。

コンクリート中への塩化物イオン浸透及び酸素拡散

は自然環境下では長期間に亘るため、鉄筋腐食の発生にも一般には長期の時間がかかる。そこで、鉄筋腐食促進試験として、温海水乾湿繰返し試験を行った。試験装置の概要を図-28に示す。供試体は図-29に示すように、中央に鉄筋が埋設される状態で小型RC供試体(100×100×400mm)から切断した100×100×100mmで、鉄筋端部には自然電位及び分極抵抗測定のためのリード線を接続してエポキシ樹脂で被覆した。その後、生物付着の影響が現れやすいよう生物付着面1面を残して5面をゴム系被覆材で被覆した。乾湿繰返しは、60℃温海水浸漬3.5日、室温乾燥3.5日とし、7日間で1サイクルとした。20サイクル終了後、分極抵抗を測定し、式(3)<sup>30)</sup>を用いて鉄筋腐食速度を算出した。

$$V_{corr} = K_D \cdot K_{corr} \cdot \left( \frac{1}{R_p} \right) \quad (3)$$

ここに、 $V_{corr}$ :腐食速度(cm/y)、 $R_p$ :分極抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )、 $K_D$ :速度定数( $\text{cm}^3/\text{y}/\text{A}$ )、 $K_{corr}$ :金属種類、環境等によって決まる定数(V)

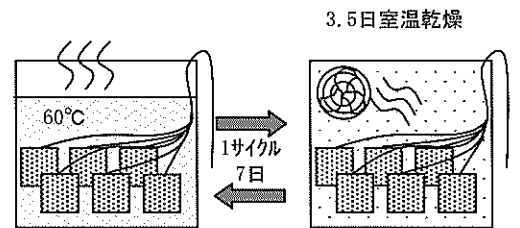


図-28 温海水乾湿繰返し試験装置概要

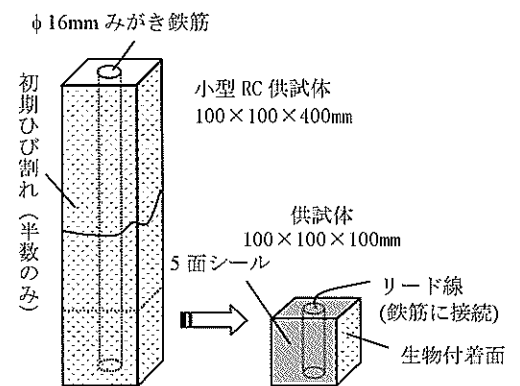


図-29 温海水乾湿繰返し試験用供試体作製状況

試験結果より求めた鉄筋腐食速度の算出結果を図-30に示す。鉄筋腐食速度は $0.05 \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{mm}/\text{y}$ の範囲にあり、既往の研究<sup>31)</sup>と比較して非常に小さな値を示した。これは、今回実施した促進試験の試験期間が20サイクル(約5ヶ月)と短く、腐食が顕著に進んでいなかったためと考えられる。また、清水港に暴露した供試体よりも

本渡港に暴露した供試体で腐食速度が大きくなっているのは、暴露環境の差異ではなく、生物付着量の違いによるものと考えられる。図-31に、鉄筋腐食速度と生物付着面積率との関係を示す。測定点が少なく、また、若干ばらつきが大きいものの、付着面積率が大きくなると腐食速度が小さくなる傾向にあり、生物付着層の鉄筋腐食抑制効果が認められた。

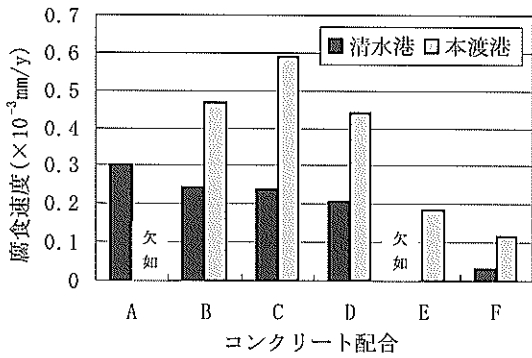


図-30 鉄筋腐食速度算出結果

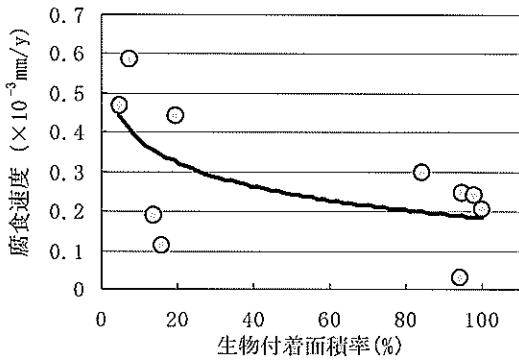


図-31 鉄筋腐食速度に及ぼす生物付着の効果

### 5.7 力学性能

付着生物がコンクリートの物性に及ぼす影響について検討を行うことを目的に、コンクリートの物理的性状を表す最も一般的な指標として圧縮強度試験を行った。さらに、部材の力学性能に及ぼす影響について確認する

ため、本渡港干満帯及び海水循環水槽干満帯に暴露した大型RC梁供試体を用いて曲げ載荷試験を行った。

#### (1) 大型RC梁供試体の仕様

大型RC梁供試体の形状及び寸法を図-32に、供試体種類を表-8に示す。供試体のパラメタはひび割れの有無、ひび割れ幅、かぶり厚さ及び電食による主筋腐食の程度とした。これらのパラメタは、暴露試験期間を考慮して比較的短期間に鉄筋腐食を発生及び進展させることを目的として設定した。ひび割れは、コンクリート打設前に型枠内にスリット（鋼板）を設置して人工的に作製した。この際、スリット幅は、設計上の許容ひび割れ幅（0.175mm）より小さいもの（0.1mm）と大きいもの（0.3mm）の二種類とした。また、主筋側のかぶりは、通常の厚さ（50mm）とそれより小さいもの（25mm）の二種類とした。さらに、電食の程度は、供試体表面にひび割れを生じない程度の軽度なもの及びひび割れを生じた重度なもの二種類とした。コンクリートにはA配合を使用した。主筋にはD16mm（SD345）を3本、組立筋にはφ6mm（SR235）を使用した。

表-8 大型RC梁供試体種類

供試体No.	暴露場所	特徴
H1	本渡港	基本
H2	本渡港	スリットによるひび割れ0.1mm
H3	本渡港	スリットによるひび割れ0.3mm
H4	本渡港	かぶり25mm
K1	海水循環水槽	基本
K2	海水循環水槽	スリットによるひび割れ0.1mm
K3	海水循環水槽	スリットによるひび割れ0.3mm
S1	清水港	基本
S2	清水港	スリットによるひび割れ0.3mm
S3	清水港	電食軽度（ひび割れ発生なし）
S4	清水港	電食重度（ひび割れ発生あり）
K4	海水循環水槽	基本
K5	海水循環水槽	電食軽度（ひび割れ発生なし）

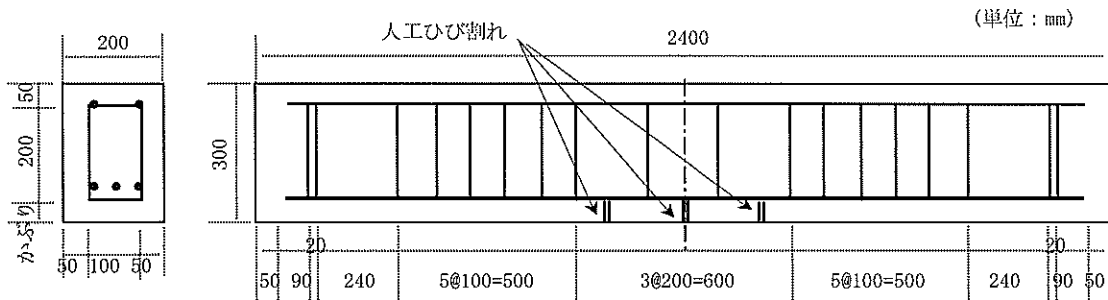


図-32 大型RC梁供試体寸法

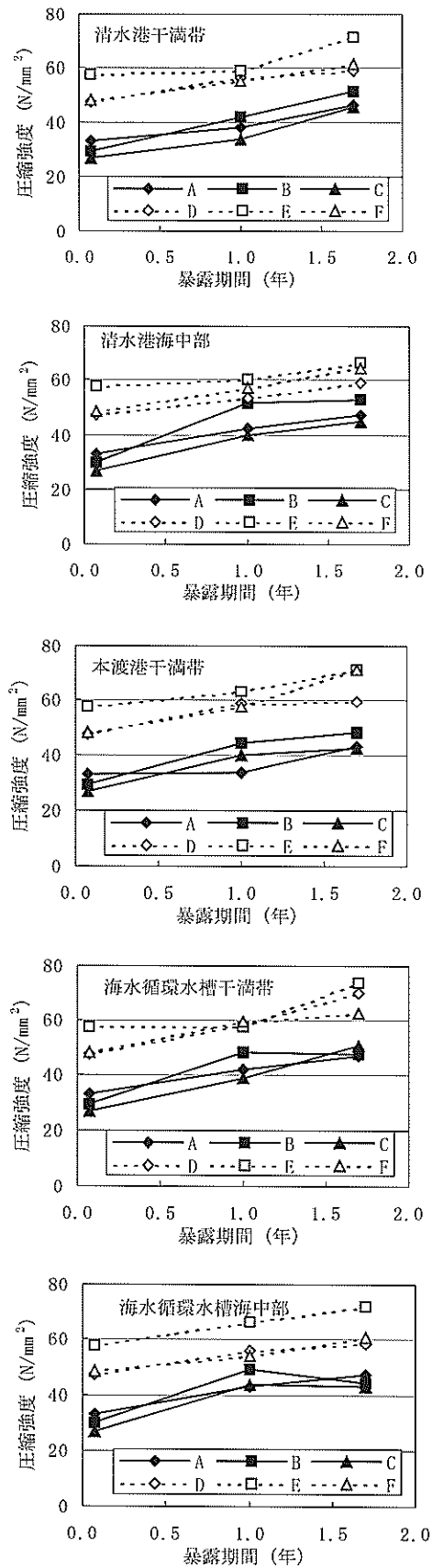


図-33 圧縮強度試験結果

(2) コンクリート及び鉄筋の物性

圧縮強度試験用に作製した供試体 (100×100×400mm) をダイヤモンドカッターにより100×100×200mmの寸法に二等分し、切断面を研磨した後、JIS A 1114<sup>32)</sup> に準じて圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験用に100×100×400mm供試体を作製した理由は、暴露試験場の空間的な制約によるものである。

供試体2体の平均値を図-33に示す。ここに示す値は測定値であり、供試体の形状及び寸法の補正は行っていない。全ての供試体は暴露試験実施前に28日間水中養生を行っており、暴露開始時期より十分な強度発現が認められる。どの暴露試験場においても水結合材比の大きいA, B, C配合で強度は小さく、水結合材比の小さいD, E, F配合で強度は大きくなっている。このように、圧縮強度に及ぼす影響は水結合材比の要因が大きく、生物付着量が強度発現に及ぼす影響については明らかとならなかった。しかし、ほとんどの配合において暴露後1年8ヶ月まで順調な強度増進を示していることから、付着生物が圧縮強度に悪影響を与えることはないものと推定された。また、海水飛沫あるいは海水浸漬による悪影響もないものと考えられた。一方、大型RC梁供試体の管理用に作製したφ100×200mm供試体の圧縮強度及び弾性係数試験結果を表-9に示す。測定値は、原則として供試体2体の平均値である。表-9より、圧縮強度及び弾性係数とも、暴露期間1年8ヶ月時点において測定値は暴露前と同程度かあるいは増進しており、付着生物あるいは海水暴露による悪影響は認められなかった。また、大型RC梁供試体の主筋に用いた鉄筋 (D16mm, SD345) の引張試験結果を表-10に示す。表-10に示すように、規定値以上の強度を有していることが確認された。これらの試験結果は、材料の物性を確認するとともに、大型RC梁供試体の曲げ載荷試験結果の補正に用いた。なお、コンクリートの弾性係数試験はJIS Z 2241<sup>33)</sup> に、鉄筋の引張試験はJIS A 1149<sup>34)</sup> に準じて行った。

(3) 耐荷性能

曲げ載荷試験は、曲げスパン及びせん断スパンともに700mmの3等分2点載荷とした。試験状況を写真-8に示す。鉄筋降伏荷重まで載荷した後、一度除荷し、その後供試体が破壊するまで載荷した。載荷試験における測定項目は、載荷荷重、支点、載荷点及びスパン中央における鉛直方向変位、曲げスパン内における主筋位置での水平方向変位、圧縮線におけるコンクリートひずみ、及び載荷に伴って発生したひび割れの幅とした。

表-9 圧縮強度及び弾性係数試験結果 (φ100×200mm)

供試体 No.	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		弾性係数(×10 <sup>6</sup> N/mm <sup>2</sup> )	
	暴露前	暴露後	暴露前	暴露後
H1 H2 H3 H4 K1	45.3	46.0	29.3	33.2
K2	36.6	59.4	26.5	35.5
K3	36.0	61.1	26.4	37.4
S1 S2 S3 S4 K4 K5	38.9	-	30.6	-

表-10 主筋の引張試験結果

供試体 No.	降伏荷重 (kN)	破断荷重 (kN)	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
H1 H2 H3 H4 K1	72.4	115	365	579
K2 K3	75.6	115	380	578

表-11に曲げ載荷試験結果の概要を、図-34に荷重-梁スパン中央たわみ関係を示す。ここで、最大変位とは、最大荷重載荷時のスパン中央部のたわみを示す。また、これらの値は、コンクリート及び鉄筋の物性による補正後の値である。

図-34に明らかなように、初期ひび割れを有しない供試体では、暴露場所すなわち生物付着の有無に関わりなく、ほぼ同様の荷重-たわみ曲線が得られた。また、初期ひび割れ(0.1mm及び0.3mm)を有する供試体においても、最大変位に相違が認められるのみで、降伏荷重及び最大荷重はほぼ等しい値であった。これらの結果から明らかなように、生物付着が耐荷性能に及ぼす影響は認められなかった。

一方、表-11に示すように、初期ひび割れの有無に視点をおいた場合には、ひび割れを有しない基本供試体の方が、ひび割れを有する供試体よりも降伏荷重は大きく、最大荷重も同程度かそれ以上であった。

また、かぶりが小さい供試体では降伏荷重及び最大荷重ともに基本供試体よりも大きくなっているが、これはかぶりを小さくすることにより、コンクリート梁の有効高さが大きくなったことが原因である。これらの結果から明らかなように、耐荷性能においては生物付着の効果は認められず、初期ひび割れの影響が明確であった。これは、(4)項で後述するように、耐荷性能に影響を及ぼす要因が、生物付着量ではなく内部鉄筋の腐食程度であるためと考えられた。

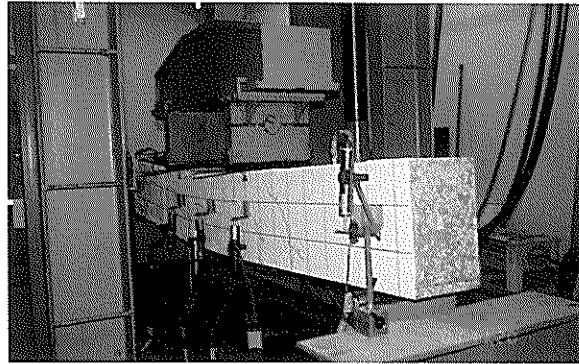


写真-8 曲げ載荷試験状況

(4) ひび割れ性能

載荷試験終了時におけるひび割れ発生状況を付録図C.1に示す。いずれの供試体においても、曲げ引張破壊型のひび割れ発生状況を示していた。

(5) 鉄筋腐食状況

載荷終了後の供試体から主筋3本を取り出して腐食状況を確認した。鉄筋の展開図における腐食状況を付録図C.2に示す。初期ひび割れを有する供試体(H2, H3, K2, K3)では、腐食は初期ひび割れ近傍(曲げ

表-11 曲げ載荷試験結果概要

供試体 No.	暴露場所	特徴	ひび割れ発生荷重(kN)	降伏荷重(kN)	降伏変位(mm)	最大荷重(kN)	最大変位(mm)
H1	本渡港	基本	29	142	6.22	166	44.26
H2	本渡港	スリット0.1mm	—	136	5.75	158	34.48
H3	本渡港	スリット0.3mm	—	138	5.82	159	35.72
H4	本渡港	かぶり小	25	162	5.41	177	38.38
K1	海水循環水槽	基本	30	145	6.25	162	43.11
K2	海水循環水槽	スリット0.1mm	—	140	6.37	165	37.12
K3	海水循環水槽	スリット0.3mm	—	142	6.26	168	29.39

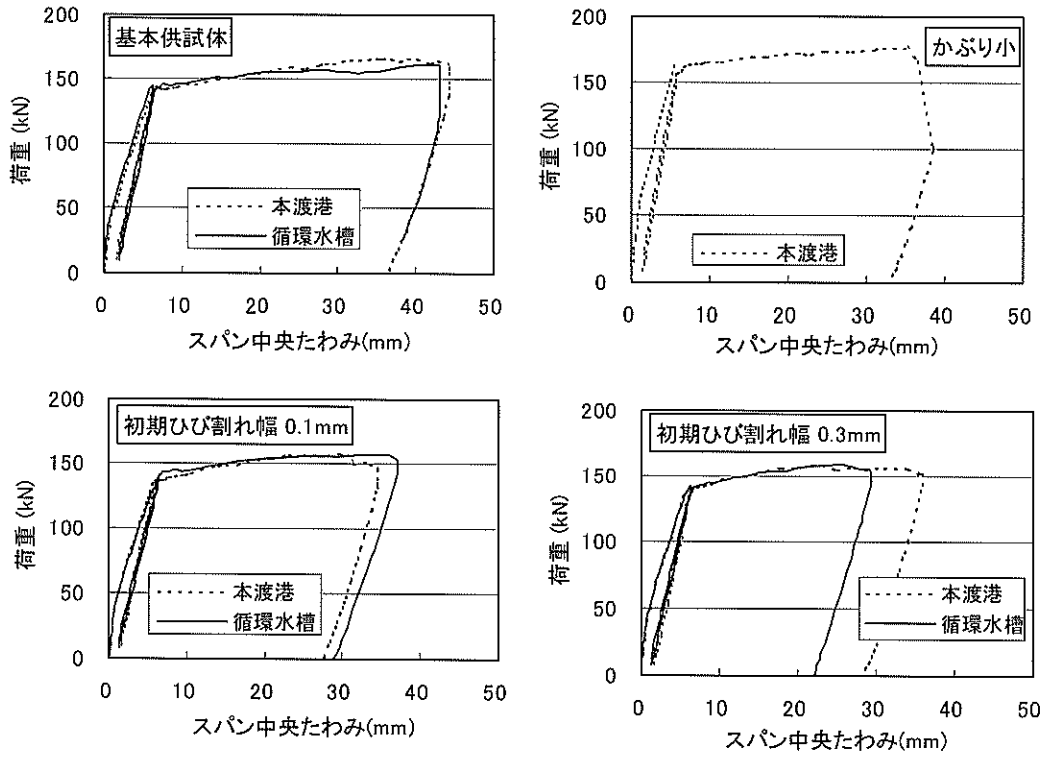


図-34 荷重—スパン中央たわみ曲線

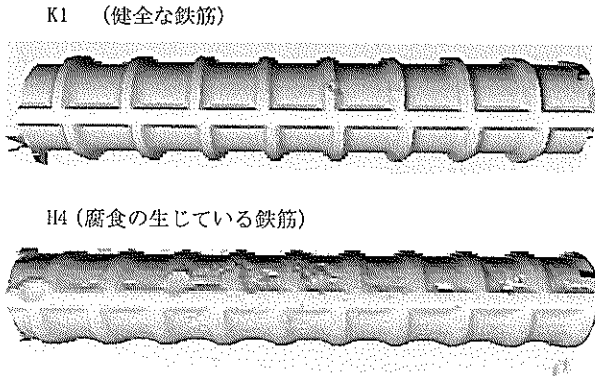


図-35 鉄筋の三次元測定結果

スパン) にもみ発生していたが、これらに対し、本渡港にのみ暴露したかぶりが小さい供試体 (H2) では鉄筋全面にわたって腐食が発生していることが認められた。なお、本渡港及び循環水槽とも、スリットによる初期ひび割れがなく通常のかぶりを有する基本供試体 (H1, K1) では、鉄筋の腐食は認められなかった。

図-35は、100mm長さに切り出した鉄筋の腐食状況を三次元的に測定した結果である。測定にはローランドディーラー社製3Dスキャナ (PIX-30) を用いた。健全な鉄筋に比べて、腐食が発生している鉄筋ではリブ及びふしが崩れてきていることが認められる。これを断面積の減少量に数値化したものが図-36である。腐食の生じていな

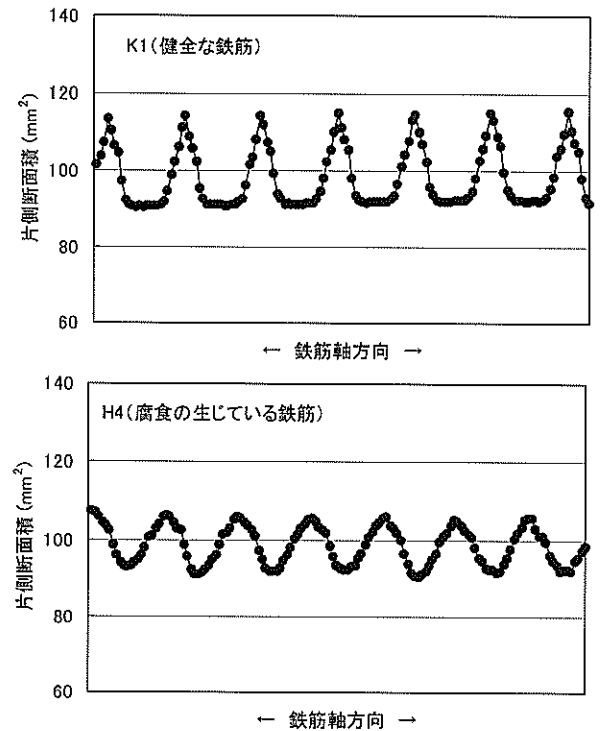


図-36 断面減少量に数値化した鉄筋腐食量

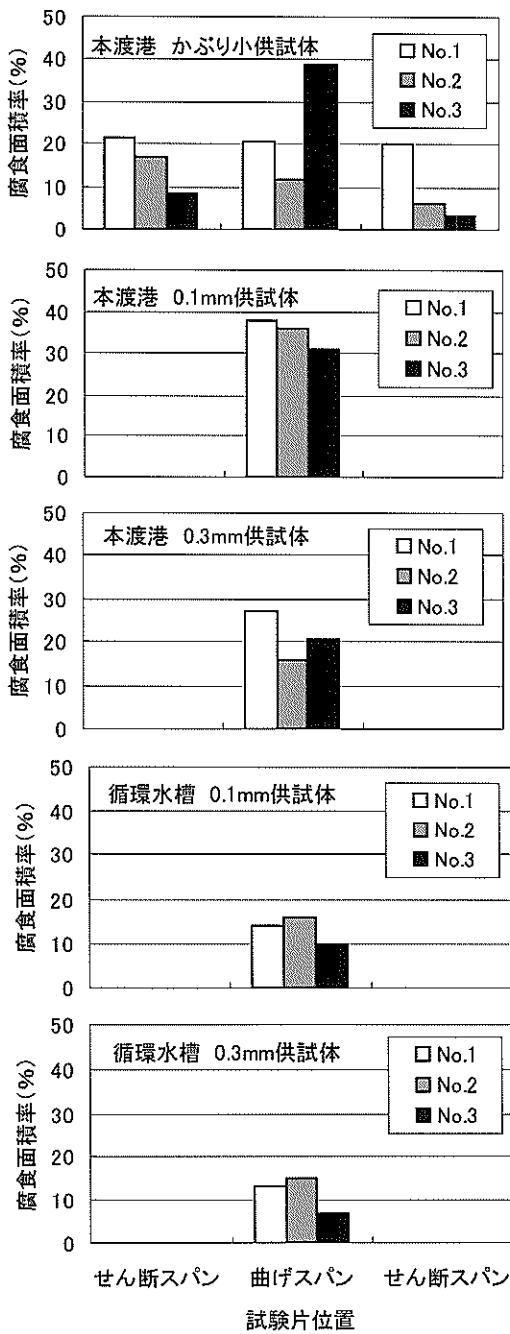


図-37 主筋の腐食面積率

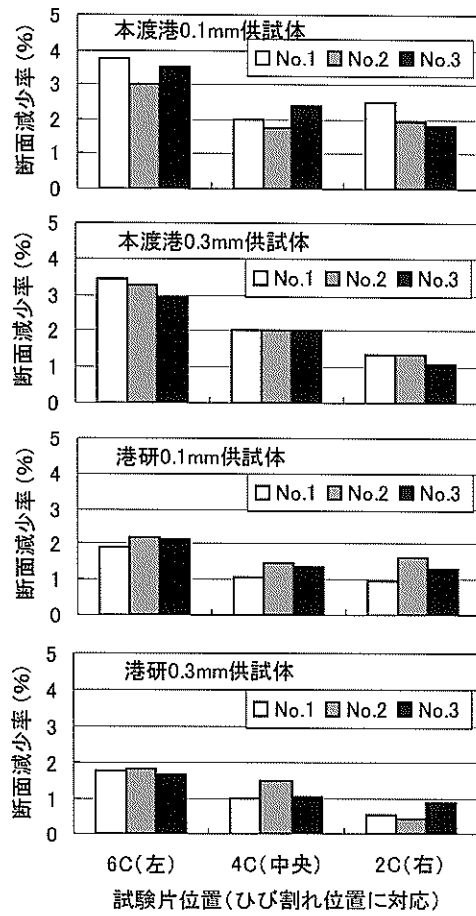


図-38(1) 主筋の断面減少率

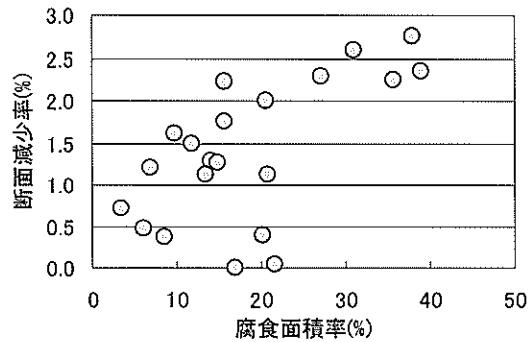


図-39 腐食面積率と断面減少率との関係

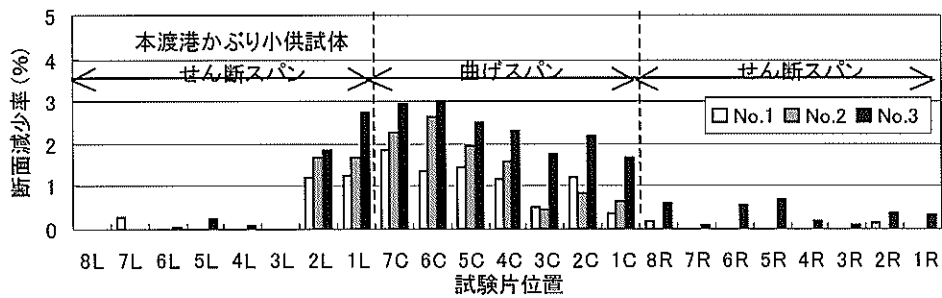


図-38(2) 主筋の断面減少率 (本渡港かぶり小供試体)

い健全な鉄筋 (K1) では、ふしの山が鋭角に残っていることが明らかであるのに対し、鉄筋全面にわたって腐食が進んでいる鉄筋 (H4) ではふしの山が全体的になだらかになっており、ふしが消滅しつつある状況が認められた。このように、鉄筋のふし及びリブが消滅することによってコンクリートとの付着性能が低下し、構造性能に影響を及ぼすものと考えられる。腐食が発生している鉄筋については、腐食面積率及び断面減少率の測定を主筋3本のそれぞれについて行った。測定結果を図-37及び図-38に示す。図中、No.1~No.3は3本の主筋を表しており、No.1は供試体内部で最も海側に配筋されたもの、No.3は最も陸側に配筋されたもの、No.2は両者の中間に配筋されたものである。ここで、腐食面積率は、鉄筋を曲げスパン (700mm) とせん断スパン (800mm×2) に分け、それぞれの鉄筋について、腐食している面積をスパン長さに相当する鉄筋表面積で除した値とした。また、断面減少率は鉄筋を長さ100mmに分け、それぞれの鉄筋に対して質量減少量を理論質量で除し、断面減少量に換算した。

本渡港に暴露した供試体では、ひび割れ幅が大きい (0.3mm) 供試体よりも小さい (0.1mm) 供試体で腐食面積率及び断面減少率ともに大きくなっており、ひび割れ幅との関係を考慮すると逆転現象が起きている。これは (5) 項で後述するように、付着生物によるひび割れ閉塞状況と関連していると考えられる。海水循環水槽に暴露した、生物が付着していない供試体においては、このようなひび割れ幅と鉄筋腐食量との間の逆転現象は認められなかった。

また、腐食面積率と断面減少率との関係を図-39に示す。腐食面積率が増加すると断面減少率も増加しており、両者の間には良好な相関関係が認められた。

#### (6) 付着生物によるひび割れ閉塞状況

(5) 項で述べたように、ひび割れ幅と鉄筋の腐食程度には相関性が認められず、これには付着生物によるひび割れの閉塞状況が影響を及ぼしていることが考えられた。現場調査においても暴露期間1年時点においてひび割れへの生物付着が確認されており、自然電位測定結果 (図-15) から、ひび割れ幅が大きい供試体 (H3) の方が電位は貴になっており、付着生物の閉塞による鉄筋腐食抑制効果があることが推測された。

付録写真B.3に、付着生物によるひび割れ閉塞状況を示す。本渡港に暴露したひび割れを有する供試体 (2体) のひび割れ近傍の状況であるが、ひび割れ幅0.1mmの供試体よりもひび割れ幅0.3mmの供試体の方が生物付着量が多いことが認められる。

そこで、付着生物によるひび割れ閉塞率を求め、これと鉄筋腐食量との関係について検討を行った。ひび割れ閉塞率は、生物付着によりひび割れが閉塞されている長さを測定し、これを供試体下面におけるひび割れ長さ全長 (200mm) で除した値とした。また、鉄筋腐食量の指標には腐食面積率を用いたが、これは (4) 項で述べた鉄筋腐食面積率とは異なり、ひび割れ近傍における生物付着の効果を明確にするため、対象とする鉄筋長さをスパン長さ (700mm) ではなくひび割れを中心にした100mm (全長200mm) とした。両者の関係を図-40に示す。測点数が少ないため両者の関係は明確ではないが、ひび割れ閉塞率が大きくなると鉄筋の腐食面積率は小さくなる傾向が認められ、生物付着により鉄筋腐食が抑制されていると考えられた。

なお、この両者の関係については、長期の暴露試験を継続して確認する予定である。

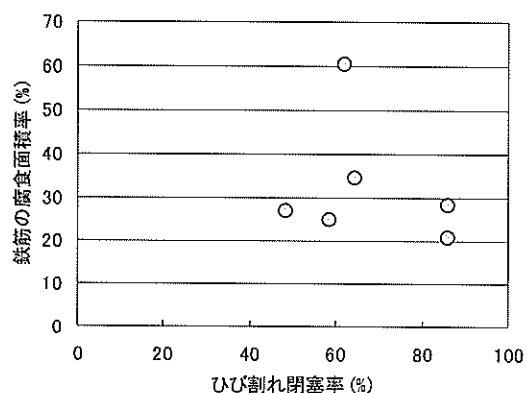


図-40 ひび割れ閉塞率と腐食面積率との関係

### 5.8 生物付着が鉄筋の腐食抑制に及ぼす効果

前節までに述べたように、実海洋環境における暴露試験では生物付着が鉄筋の腐食抑制に及ぼす効果を定量的に把握できたが、完全に定量的に把握するまでには至らなかった。一方、生物の付着した暴露供試体を用いた室内促進試験ではその効果を定量的に評価することができた。すなわち、付着生物はその緻密な組織の付着層により、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透及び酸素の浸透を抑制し、鉄筋腐食速度を低減していることが明らかとなった。また、生物がひび割れ上に付着することで直接的にひび割れを閉塞し、鉄筋腐食を抑制している可能性も明らかとなった。

## 6. 生物付着効果を考慮した性能設計に関する検討

本章では、前章までに確認された生物付着効果を、鉄



筋腐食を対象とした構造物の劣化モデルに基づいて性能設計に導入する方法について検討を行った結果をとりまとめる。また、海生生物が成長する過程でのコンクリート中への塩化物イオンの浸透予測、及びコンクリート中の鋼材の腐食進行予測を行い、劣化モデルに基づいたパラメスタディを実施し、最終的に生物付着量が構造物の耐久性に及ぼす効果を定量的に示した。

### 6.1 構造物の劣化モデルの提案

構造物の設計にあたっては、まず、設計される構造物の設計耐用期間を、社会的要請及び構造物に求められる機能等から設定し、次に、供用期間中、構造物が安全で耐久であるよう構造物断面、鉄筋量、鉄筋位置、かぶり、コンクリート配合等を決定する。従来の設計手法では、耐久性から決まる構造物の寿命が設計耐用期間を満足しない場合には、上述の設計条件から、構造物断面、鉄筋量、鉄筋位置、かぶり、コンクリート配合等を適宜変更する必要が生じる。しかし、これらは物理的に困難な場合があると同時に、施工性や美観等、他の性能を満足しない場合も考えられ、またコストの著しい上昇を招く恐れもあることから、大幅な設計変更は非合理である場合が多い。

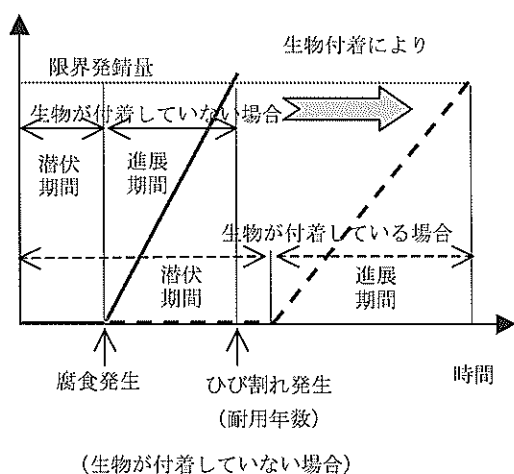


図-41 鉄筋腐食の観点からみた構造物の寿命モデル

そこで、生物付着効果を設計条件に取り入れることができれば設計当初から生物付着条件を導入することにより水セメント比やかぶり厚の低減を期待することができ、これにより、経済的であるとともに環境保全に資する構造物の設計が可能となると考えられる。

図-41に鉄筋腐食による構造物の寿命モデルを示す。

図-41に示すように、構造物中の鉄筋が限界発錆量に達し、腐食ひび割れが発生する時点を経た構造物の耐用年数と

定義すると、耐用年数は腐食発生までの潜伏期間と、腐食発生後ひび割れ発生までの進展期間とによって決定される。

このとき、潜伏期間は主としてコンクリート中の塩化物イオン拡散に支配され、進展期間は酸素拡散に支配されると考えられる。5章で述べたように、海生生物が付着することにより塩化物イオン拡散及び酸素拡散を低減することが可能であることから、潜伏期間及び進展期間をととも延ばすことができ、ひいては構造物の耐用年数を延ばすことができると考えられる。

ただし、このような考え方は、当初設計どおり生物が付着して初めて達成されるものであることを銘記しておく必要がある。

### 6.2 提案モデルによるパラメスタディ

6.1節に示した劣化モデルを用いて、生物付着が耐用年数の延長に及ぼす効果についてのパラメスタディを行った。ここでは、6.1節で述べたように、構造物の耐用年数を鉄筋腐食の潜伏期間及び進展期間の合計年数と設定し、算出条件として5.4節～5.6節において述べた促進試験結果を用いた。

まず、鉄筋腐食の潜伏期間に対しては、生物付着量と塩化物イオン拡散係数の関係を示した図-22より、生物が付着しない場合の塩化物イオン拡散係数を $1.5\text{cm}^2/\text{y}$ とし、生物付着量の増加に伴って拡散係数を低減することとした。生物付着がない場合の $1.5\text{cm}^2/\text{y}$ という値は、棧橋コンクリートの上部工（梁及び床版）を対象とした11地点52測点における調査結果<sup>35)</sup>の平均値 $1.44\text{cm}^2/\text{y}$ と同等の値であり、妥当な値と考えられた。次に、鉄筋腐食の進展期間に対しては、ひび割れ発生が鉄筋の断面減少量に依存するものとして、これまでの研究<sup>36)</sup>から鉄筋断面減少率が1.5%に達するまでの時間と仮定した。鉄筋腐食速度は、既往の研究成果<sup>31)</sup>を参考に $10 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{y}$ とし、生物付着面積率と腐食速度との関係を示した図-30より、生物が付着した場合の低減率を求めた。その他の設計条件として、コンクリートのかぶりを70mm、鉄筋をD25と設定し、コンクリート表面における塩化物イオン濃度を飛沫帯として $13.0\text{kg}/\text{m}^3$ 、鉄筋腐食発生限界濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

結果を表-12に示す。生物が付着しない場合には耐用年数が約15年であるのに対し、生物が付着面積率で40%程度付着した場合には約30年、100%付着した場合には約80年と、耐用年数はそれぞれ付着しない場合の約2倍、約3倍となる結果が得られた。

表-12 提案モデルによるパラメタスタディ結果

付着面積率	Cl <sup>-</sup> イオン拡散係数 (cm <sup>2</sup> /y)	潜伏期間 (y)	腐食速度 (10 <sup>3</sup> mm/y)	進展期間 (y)	耐用年数 (y)
0%	1.5	5.8	10	10.0	15.8
20%	1.0	8.7	7	14.3	23.0
40%	0.7	11.6	5	20.0	31.6
80%	0.4	21.6	4	25.0	46.6
100%	0.3	28.8	3	50.0	78.8

### 6.3 塩化物イオンの浸透予測

前節では、生物付着が構造物の耐用年数の延長に及ぼす効果について、鉄筋腐食という観点から室内促進試験結果に基づいて算出した。本節及び次節では、暴露試験結果を基に、生物付着面積率の経時変化及び塩化物イオン含有量のシミュレーションを行い、この結果を用いて塩化物イオン濃度分布及び鉄筋腐食度の経年変化の予測を実施する。

5.4 節で述べたように、コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度は生物付着層により抑制されることが明らかとなった。そこで、海生生物が付着した場合のコンクリート表面における塩化物イオンの移動モデルを考案し、塩化物イオン浸透状況のシミュレートを行った。

#### (1) 生物付着層形成の予測

塩化物イオンの浸透予測に先立ち、まず、生物付着層形成の予測を行った。生物付着層はコンクリート表面に均一に形成されるのではなくある面積率をもって形成されるため、コンクリート表面における拡散係数を一般の表面被覆材のように低減することはできない。そこで、ここでは図-42 に示すモデルを考案した。

モデル化にあたっては、以下のように生物付着層の影響を仮定した。すなわち、生物付着層はコンクリート表面の塩化物イオンの拡散係数を低減すること、コンクリ

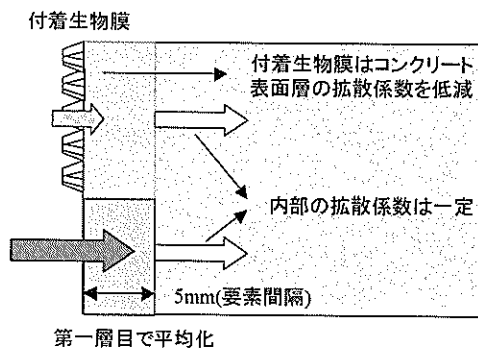


図-42 付着生物による拡散係数低減モデル

ート表層における塩化物イオンの擬似吸着の効果<sup>37)</sup>も低減すること、生物付着部と非付着部のコンクリート第一層への塩化物イオンの浸透はそれぞれ独立に計算し、コンクリート第一層の塩化物イオン濃度を生物付着面積率に応じて加重平均することである。

上記のモデルは付着生物がある面積率をもった時刻の塩化物イオンの浸透状況を表している。しかし、生物の付着面積は時間と共に変化し、生物付着以前にコンクリート中に塩化物イオンが浸入する場合も考えられる。また、付着初期には塩化物イオンの浸透と付着層の形成が同時に起きるため、塩化物イオン濃度の分布をシミュレートするためには付着層が形成される速度をモデル化する必要がある。そこで、付着層が形成される影響を式(4)で表した。

$$A_f = f_{\max} \cdot 0.5 \cdot [\tanh\{A \cdot (T - B)\} + 1] \quad (4)$$

ここに、 $A_f$ :生物付着面積率、 $f_{\max}$ :最終付着面積率、 $A$ :付着速度に関わる係数、 $T$ :暴露期間(day)、 $B$ :付着面積率が50%になる期間(day)

表-13 に、生物付着面積率のシミュレートに用いたパラメタを暴露場所及びコンクリートの配合別に示す。ここで、最終付着面積率は暴露期間1年8ヶ月時点の測定値を用いた。これらのうち、清水港に暴露したD及びE配合では、ごく初期から付着生物が供試体表面を覆っていたと仮定した。

図-43 に測定結果とシミュレート結果を併せて示す。図中、測定結果は丸印で、式(4)によるシミュレート結果は線で示した。いずれの暴露場所及びコンクリート配合においても、生物付着面積率の増加傾向をある程度の精度をもってシミュレートすることが可能であった。

#### (2) 塩化物イオン濃度分布の予測

上述のモデルを用いてコンクリート中への塩化物イオン濃度の分布のシミュレートを行った。表-14に塩化物イオンの見かけの拡散係数及び生物付着によるコンクリート表層部の拡散係数の低減率を示す。これは、暴露供試体の塩化物イオン濃度分布から求めた拡散係数と、シミュレートによる拡散係数とが一致するよう低減率を定めた結果である。生物が付着した場合には、拡散係数は付着しない場合の1/100程度に小さくなることが明らかとなった。

この条件を用いて行ったシミュレート結果を図-44に示す。これより、暴露場所の相違は生物付着面積率のパラメタの相違として表すことができ、同一配合であれば暴露場所が異なっても塩化物イオンの拡散係数や

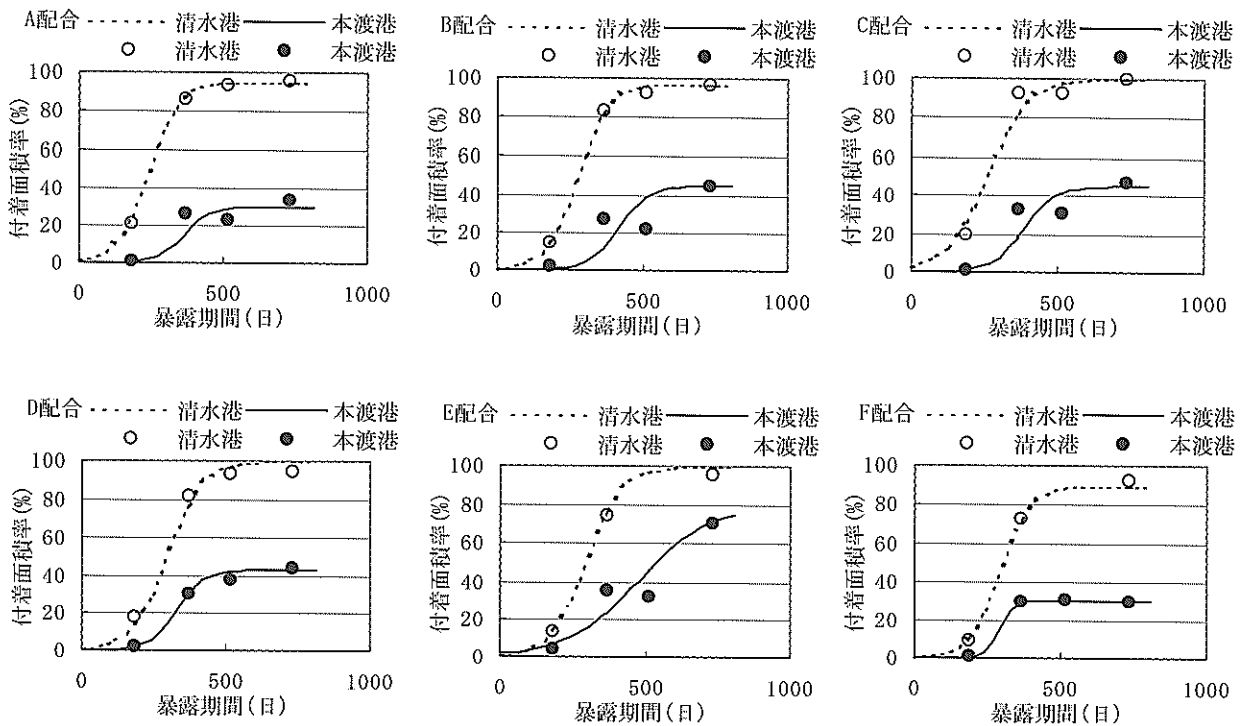


図-43 生物付着面積率の経時変化 (測定結果及びシミュレート結果)

表-13 生物付着面積率の算出に関するパラメタ

暴露場所	配合	係数		
		$f_{max}$	A	B
清水港干満帯	A	0.95	0.65	3.5
	B	0.97	0.75	3.5
	C	1.00	0.70	2.6
	D	1.00	0.05	8.0
	E	1.00	0.00	10.0
	F	0.90	0.80	3.5
本渡港干満帯	A	0.30	1.00	4.0
	B	0.45	1.15	3.5
	C	0.45	1.05	3.5
	D	0.43	0.90	4.0
	E	0.30	1.00	4.0
	F	0.30	0.80	8.0

表-14 塩化物イオン算出に関するパラメタ

配合	A	B	C	D	E	F
拡散係数 (cm <sup>2</sup> /y)	2.80	1.00	1.10	0.70	0.30	0.40
低減率	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表面拡散係数の低減率は同じ値を用いることが可能であることがわかる。したがって、生物付着の効果は考案したモデルにより再現できると同時に、モデルの妥当性も検証されたと考える。

なお、5.4節で述べたように、電気泳動法により算出した塩化物イオンの拡散係数は、生物付着面積率が100%

の場合でも生物付着がない場合の1/3~1/4程度であり、本検討とは大きく異なる結果となった。既往の文献<sup>26)</sup>によれば両者の関係は理論的に提示されるものと考えられており、この点は研究継続にあたっての今後の検討課題と考えている。

表-15 鉄筋の腐食度

腐食度推定値	鋼材の腐食状態
1~2	腐食なし 点錆，部分的かつ表面的な腐食がみられる
2~3	全体的かつ表面的な腐食がみられる。 浅い孔食がみられる
3~4	全体的な腐食がみられ、異形鉄筋のリブが判別できない部分もある。 断面欠損を伴う全体的な腐食がみられる

#### 6.4 コンクリート中の鋼材の腐食進行予測

鋼材の腐食進行予測は、既往のデータをニューラルネットワークにより整理したモデルを用いて行った。このモデルは、かぶり、中性化深さ、鉄筋位置における塩化物イオン濃度等により、鉄筋の腐食度を表-15に示す1から4の範囲で推定するものである。ここでは、かぶりを65mm及び85mmと設定し、鉄筋位置における塩化物イオン濃度は前節において算出した値を用いた。ただし、暴露環境として干満帯という湿潤状態を対象としている

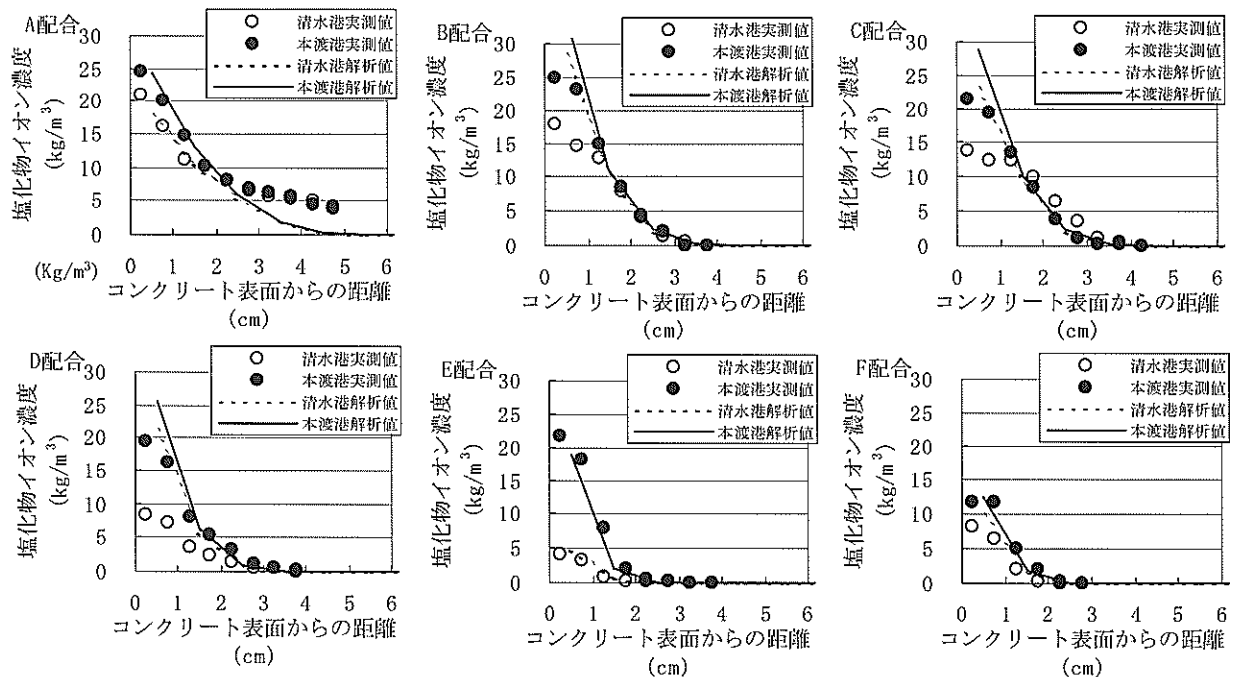


図-44 塩化物イオン濃度分布（測定結果及びシミュレート結果）

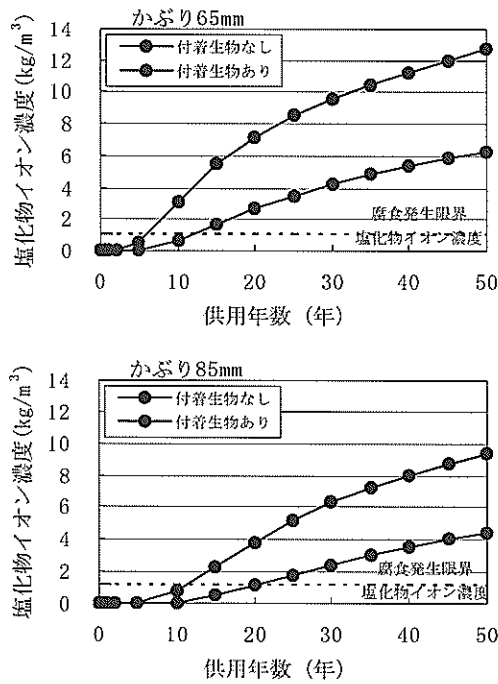


図-45 塩化物イオン濃度の経時変化の予測

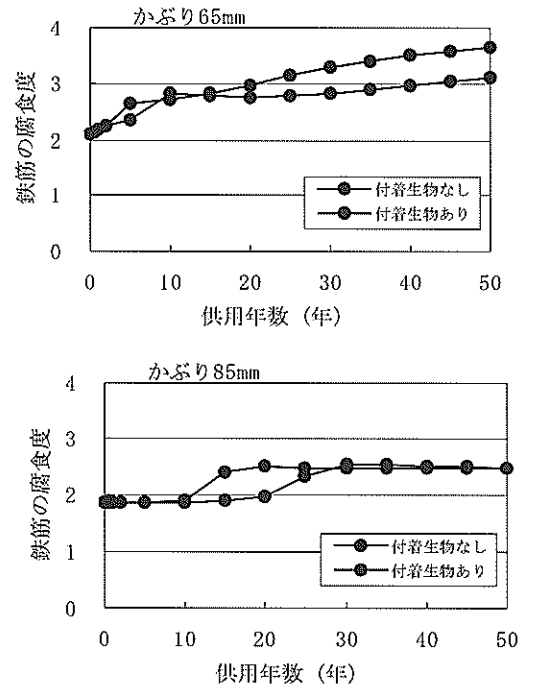


図-46 鉄筋腐食度の経時変化の予測

ことから、中性化は進行しないものと設定した。

図-45に、仮定した条件下における清水港暴露供試体D配合の、鉄筋位置での塩化物イオン濃度経時変化の解析結果を示す。腐食発生限界塩化物イオン濃度を1.2kg/m<sup>3</sup>とすれば、この塩化物イオン濃度に達するまで

の時間は、かぶり65mmでは、生物付着がない場合には5年程度と推定されるが、生物付着がある場合には10年程度と推定され、付着生物によって腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの時間が5年程度遅延される結果となった。同様に、かぶり85mmでは、生物付着の有無に

より、腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの時間は10年及び20年程度と推定され、10年程度遅延される結果となった。

図-46は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の解析結果を用いて、鉄筋の腐食度の推定を行った結果である。かぶり65mm及び85mmの場合とも生物付着がある場合には鉄筋腐食の進行が遅くなり、特に、かぶり65mmの場合にはその効果が顕著であった。

なお、腐食度2をひび割れ発生目安とすれば、ひび割れ発生までの時間は、かぶり85mmの場合には、生物付着の有無に対してそれぞれ10年及び20年となり、10年程度ひび割れ発生時期が遅延することとなった。以上より、生物付着の効果を期待できるとともに、生物付着という要因を設計値に反映できるものと考えられた。

## 7. 生物付着の実用化に関する検討

本章では、生物付着効果を構造物の耐久性向上に積極的に取り入れることを目的として、実構造物への適用方法についての提案を行った。また、不確定要因の多い生物付着という現象に対して、構造物の維持管理方法について検討を行った。

### 7.1 実構造物への適用方法

実構造物への適用方法として、大別して、現場打ちコンクリートへの適用及び二次製品への適用が考えられる。

#### (1) 現場打ちコンクリートへの適用方法

現場打ちコンクリートへの適用方法としては、主として干満帯及び海中部に生息する海生生物をコンクリート表面に付着させることで、海中部から海上部まで連続している構造物の内部鉄筋の腐食抑制を期待することができる。

コンクリート構造物が海中から海上に連続している場合、海面より少し上の部分では海水中の塩化物イオンが拡散以上に移流の影響を受けて移動し、海上部であることから十分な酸素の供給も受けるため鉄筋腐食が速く進行する。ここでいう塩化物イオンの移流とは、塩化物イオンを含むコンクリート中の毛管水が移動することにより塩化物イオンも移動することを意味している。これを模式的に示したのが図-47である。この移流の影響は、海水中におけるコンクリート表面からの塩化物イオンの浸入が抑制されれば低減されるものであり、図-47右側のコンクリート面に示すように、海生生物が付着することにより抑制効果が期待できる。このように、

海上部にある鉄筋の腐食抑制効果の他に、海中部にある鉄筋に対する腐食抑制効果も当然期待できる。ここで対象とする構造物は、栈橋下部工、ケーソン、護岸、橋脚、コンクリート浮体構造物等である。

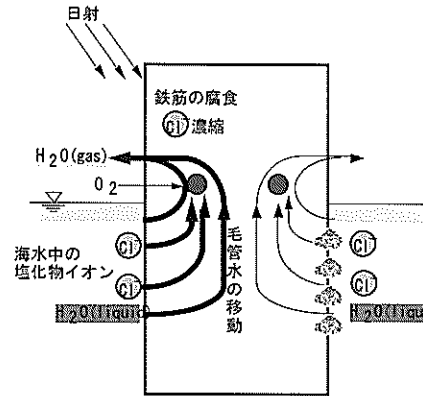


図-47 塩化物イオンの移流抑制

#### (2) ひび割れ補修効果

海中部及び干満帯におけるコンクリート表面においては、ひび割れが発生した場合、一般的にはその補修が困難である。これは、海水中で補修する材料が限られること、作業が水中作業になること等による。このような場合において写真-9に示すように、5.7節(5)項で述べたとおり海生生物がひび割れを横断して付着すると、ひび割れが生物の付着層により閉塞される。そのために、ひび割れ部分の塩化物イオンの浸入を抑制し鉄筋腐食を抑制する効果を期待することができる。これは、人工材料の注入によるひび割れ補修とは異なる方法であるが、水中部分におけるひび割れ修復としては確実であると考えられる。

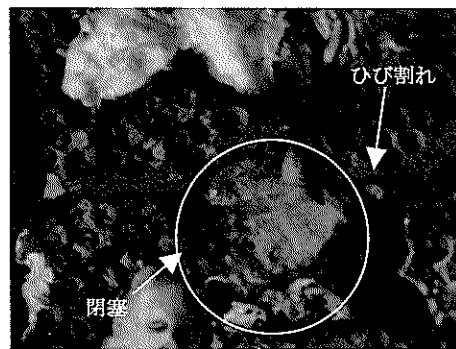


写真-9 海生生物の付着によるひび割れの閉塞

#### (3) 二次製品への適用

二次製品への適用としては、あらかじめ作製したコンクリート製品を実環境下の海水あるいは海生生物の幼

生を含む人工海水に浸漬して海生生物を付着させる方法がある。この際、コンクリートを海水に浸漬するため海生生物の付着と同時に塩化物イオンもコンクリート中に浸透することとなる。一般に、供用以前から塩化物イオンを含む構造物は使用されにくい、その濃度が種々の基準値よりも小さいことを確認するとともに、劣化予測を行うことで耐久性能を評価できれば使用することができる。本検討ケースにおいては、コンクリート中に浸透した塩化物イオンは、図-48に示すように、海生生物の付着層が形成された後、純水等に浸漬することで溶脱させることにより除去することも可能である。ここで対象とする二次製品は、コンクリート埋設型枠とU字溝等その他である。

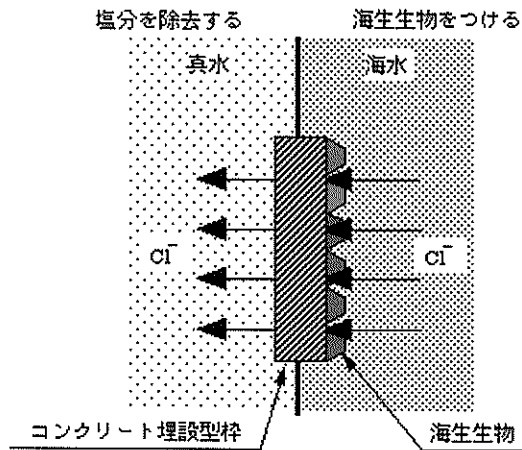


図-48 コンクリート内部の塩化物イオンの溶脱方法

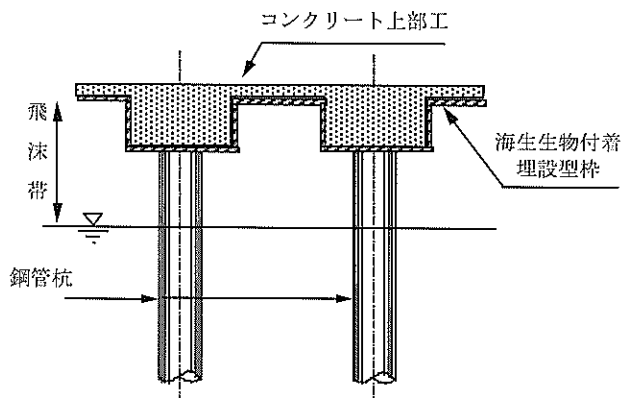


図-49 栈橋上部工における埋設型枠としての適用

コンクリート埋設型枠への適用は、あらかじめ型枠表面に海生生物を付着させ、その緻密な付着層で被覆された型枠を埋設型枠として用いることで、構造物としての表面も緻密な層で被覆する効果を期待できる。海生生物

は海中及び干満帯におけるコンクリート表面に付着するため、構造物として劣化の激しい飛沫帯では付着を期待できない。しかし、海生生物の付着層が表面に形成されている埋設型枠を飛沫帯の部位に用いることにより、飛沫帯における鉄筋に腐食進行を抑制することが可能となる。図-49は栈橋上部工における埋設型枠の適用例を示したものである。

U字溝、枠、あるいはヒューム管等への適用も、生物の付着方法は埋設型枠と同様である。このような二次製品においては、内部を流れる水に塩化物イオンが含まれている場合に生物付着層による防食性能を期待できる。また、コンクリート表面が、無機質で緻密な付着層で覆われていることにより、水流への耐磨耗性等も期待できるものと考えられる。

二次製品への適用には、現場打ちコンクリートとは異なり海生生物の付着を制御することが容易である。すなわち、海生生物が付着しやすい環境を選定すること、あるいは再現することにより、その付着状況を確認しながら目標とする付着面積率を得るように製造管理を行うことも可能である。

## 7.2 コンクリート構造物の維持管理

海生生物の付着したコンクリート構造物における維持管理手法の一つとして、点検について特徴のある点を述べる。

点検は、その特徴を考慮して以下のように考える。なお、表-16に示す点検の種類は土木学会コンクリート標準示方書維持管理編<sup>38)</sup>によるものであり、一般の点検項目である外観変状、塩化物イオン濃度、中性化深さ、鋼材の腐食、コンクリート強度、耐荷性、鋼材の位置、劣化外力等の点検も必要である。

初期点検では、一般の構造物の点検項目に加えて、海生生物付着率を測定する。これは、コンクリート表面における塩化物イオンの浸透予測等、劣化予測の際に最も重要な情報である。

日常点検では、一般の構造物の点検項目に加えて、海生生物の付着状況を目視で観察する。これは、海生生物の付着の増加あるいは減少を概略把握するための点検であり、付着程度の増減に応じてその後の劣化予測を修正する。

定期点検では、海生生物の付着面積率を測定するとともに、生物付着層の耐久性や塩化物イオン浸透抵抗性の維持性能に関するデータを蓄積する。生物付着層の残存期間は、クロフジツボを対象とした研究<sup>39)</sup>により28ヶ月までの残存が確認されている。クロフジツボの付着層は

表-16 海生生物を付着させた構造物の点検項目

点検の種類	一般的な点検項目	特殊な点検項目
初期点検	水セメント比, セメントの種類, 初期含有塩化物イオン濃度, かぶり	海生生物付着面積率
日常点検	目視によるコンクリート表面の変状観察	目視による海生生物付着状況
定期点検	目視によるコンクリート表面の詳細な変状観察, 塩化物イオン濃度, 鉄筋の腐食状況.	海生生物付着面積率
詳細点検	塩化物イオン濃度の分布	海生生物の底殻の化学的変質

中央部がないドーナツ状を呈しているが、今回対象としたタテジマフジツボやシロスジフジツボは円状の付着層を有しているため、イワフジツボの付着層よりもさらに長い期間、残存するものと考えられる。しかし、海生生物の長期に亘る研究成果は数少なく、さらに、海生生物による長期的な塩化物イオンの浸透抑制効果が明らかにされていない現在、定期的に生物付着面積率を測定すること、及び塩化物イオン濃度あるいは鉄筋の腐食度を調査することは重要である。

詳細点検では、構造物から付着層が付着しているコンクリートのサンプリングを行い、塩化物イオンの拡散試験（セル法）、粉末X線回折による付着層の化学的変質を調査する。

## 8. 結論

本研究範囲より得られた結論は以下のとおりである。

(1) 海生生物としてのフジツボの付着層組織と、付着層によるコンクリート中への物質浸透抑制効果について明らかにした。フジツボの付着層は約50 $\mu$ m程度の厚さを持ち、また、主成分はタンパク質を含む炭酸カルシウムで、セメントペーストよりも緻密な組織を形成していた。この生物付着層のある箇所の塩化物イオンの拡散係数は、付着層のない箇所の拡散係数より約1/100程度であることが認められた。

(2) 海生生物を構造物に積極的に付着させる材料、配合及び表面形状等について明らかにした。

材料については、高炉スラグやフライアッシュ、高強度混和材等、一般的に使用されている混和材を用いてコンクリートのアルカリ度を低減させることが、生物付着面積率が5%以下程度の付着初期には有効であった。また、その他の特殊な混和材として、酸化鉄、水酸化マグネシウム、膨張材等、いわゆる鉄分を含有する混和材も生物付着を促進させると考えられた。

配合については、コンクリート表面の空隙率を大きくすることが、コンクリートのアルカリ度の影響を受ける

初期付着から進んだ段階での付着促進に効果的であると考えられた。これは、付着のメカニズムとして、付着の際にタンパク質系の接着物質がアンカーを取り易いためではないかと推測された。

(3) 生物付着が促進されることにより、コンクリート中への塩化物イオンの浸入及び酸素の拡散が抑制されることを明らかにした。生物付着量と鉄筋の腐食速度との間には相関性が認められ、付着量が大きいと腐食速度が小さくなる傾向が認められた。また、コンクリート表面に存在するひび割れが生物付着により閉塞された場合には、閉塞の程度に伴って鉄筋腐食が抑制される傾向にあることを明らかにした。

(4) 構造物中の鉄筋腐食を対象として、生物付着条件を性能設計に導入してみると、生物の付着が鉄筋の腐食発生期間、腐食進展期間、及び腐食速度を遅らせる効果を有することから、生物付着が進むことにより構造物の耐用期間が延長されることが明らかとなった。

(5) 海生生物を積極的に実構造物に付着させる方法について検討を行うとともに、それらの構造物の点検、評価・判定及び対策について検討を行った。

実構造物への適用としては、二次製品として飛沫帯の防食対策にも適用できる埋設型枠や、水流への耐磨耗性も期待できるU字溝としての利用が考えられる。

構造物の点検においては、一般の点検項目に加え、海生生物の付着状況の観察、付着面積率の測定が重要であると思われる。

## 9. あとがき

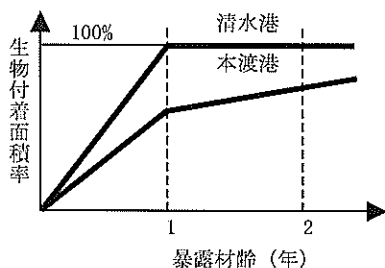
自然海洋環境下における暴露試験を通してコンクリート構造物の耐久性について検討するには、本来長期間を必要とする。本研究では、暴露試験とともに鉄筋腐食促進試験や海生生物の付着性を短期間で評価する試験等を実施し、一定の成果を得ることができた。しかし、構造物の耐久性について十分な検討を行うためには長期にわたる挙動の把握が重要であり、本研究においても

暴露試験をはじめとした研究の継続が必要と考えられる。以下に今後の課題を述べる。

(2002年5月30日受付)

#### (1) 生物付着促進技術のさらなる開発

本研究における暴露試験では、コンクリート構造物への海生生物の付着は図-50に模式的に示す増加傾向を示した。すなわち、清水港においては暴露1年で生物付着面積率がほぼ100%に達したが、本渡港においては暴露1年8ヶ月を経過しても100%に至っていない。海生生物付着によりコンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、生物が確実に付着することが重要であり、このためには生物付着を促進させる技術のさらなる開発が



必要である。

図-50 生物付着面積率の増加曲線

#### (2) 生物付着による耐久性向上効果のさらに精度の高い定量的評価と、耐久性向上効果を考慮に入れた性能設計手法の確立

本研究では、暴露試験とともに電気化学的手法による室内試験を実施し、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす要因について短期間での評価を行った。また、鉄筋腐食を対象とした構造物の寿命モデルを構築し、このモデル及び前述の室内試験結果を用いてパラメスタディを行い、生物付着面積率の増加に伴う耐用年数の延伸を明らかにした。しかし、得られた結果の普遍性は十分ではなく、今後さらに精度の高い定量的評価と、それらを基にした性能設計手法の確立が必要である。

#### (3) 海生生物を積極的に付着させた構造物の施工法及びメンテナンス法の確立

生物付着に視点を置いたコンクリートの実構造物への適用として、二次製品としては飛沫帯の防食対策にも適用できる埋設型枠としての利用が有効であると考えられる。また、海生生物の付着層がコンクリート表面のひび割れを閉塞することから、ひび割れの修復効果を期待できると考えられた。今後は、これらの概念を基に、実構造物において付着を実現する具体的方法についての検討を実施し、海生生物が付着した構造物の施工法及びメンテナンス法を確立することが必要である。

#### 謝辞

本研究は、運輸施設整備事業団平成11年度「運輸分野における基礎的研究推進制度」の助成により実施したものであり、御援助いただいた関係各位に感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、九州大学大学院理学府附属臨海実験所 森敬介助手には、海生生物の生態について御教授いただくとともに、終始、暴露試験に対する御助言と御示唆をいただきました。ここに深謝の意を表します。

株式会社海洋バイオテクノロジー研究所清水研究所 紙野圭グループリーダー及び松尾聖子研究員には、キプリス幼生付着試験に関し多大な御協力をいただきました。特に、同試験に関しての貴重なデータは松尾聖子研究員の無私御協力なくしては得られないものであり、ここに記して深甚なる謝意を表します。

川崎製鉄株式会社技術研究所客員研究員 K. Nandakumar博士（現 産業技術総合研究所四国センター）には、バイオフィルム着生試験に際して懇切丁寧なる御指導をいただきました。また、松永久宏主任研究員、及び小菊史男主任研究員には同実験に対する貴重な御助言と御協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

シンガポール国立大学 Wee Tian Huan助教授には、生物付着実験の貴重な事例である暴露試験場を見学させていただきました。また、主席研究部長 藤原浩己博士（現 宇都宮大学助教授）をはじめハイパフォーマンスコンクリート研究室の皆様には、意見交換を通して本研究に関しての有意義なアドバイスをいただきました。ここに感謝の意を表します。

熊本県土木部港湾課、熊本県天草地域振興局土木部、及び国土交通省中部地方整備局清水港湾工事事務所の方々には、暴露試験の実施に際し多大の御支援と御協力を賜りました。心より感謝いたします。

本報告のとりまとめにあたっては、上記研究推進制度の共同研究者である、東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 坂井悦郎助教授、吉田夏樹大学院生（現 財団法人日本建築総合試験所）、電気化学工業株式会社特殊混和材事業部特混技術課 真下昌章氏、同社青海工場セメント・特混研究所 渡邊芳春副主任研究員、大成建設株式会社技術センター土木技術研究所土木材工研究室 宇治公隆前主任研究員（現 東京都立大学）、新藤竹文主任研究員、丸屋剛副主任研究員、武田均研究員、堀口賢一研究員（現 東京支店）、港湾空港技術研究所材料研究室 阿部正美主任研究員（現 株式会社ナカボ



一テック), 山路徹研究官の皆様の御協力を得ました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

暴露試験データの採取にあたっては, 東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻 西澤由華大学院生(現ソニー株式会社), 電気化学工業株式会社特殊混和材事業部特混技術課 清水久行氏, 同社青海工場セメント・特混研究所 七沢章氏, 富岡茂氏, テクノコンサルタン卜株式会社大阪試験室 吉岡隆氏, 大成サービス株式会社 岡迫昭則氏, 田中恒治氏, 花健次氏, 港湾空港技術研究所材料研究室 前受託研修生 早川健司氏(現 東急建設株式会社), 小菊史男氏(現 川崎製鉄株式会社), 青山敏幸氏(現 株式会社ピー・エス), 構造強度研究室 菅原亮研究員(現 関東地方整備局), 同 前受託研修生 福島賢治氏(現 若築建設株式会社)の方々に御協力いただきました。ここに心より御礼申し上げます。

本研究は, 多くの方々の御指導, 御協力の下に遂行されました。皆様方のこれまでの御厚情に対して感謝の意を表し謝辞といたします。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998年.
- 2) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会, 2000年.
- 3) 電気化学協会海生生物汚損対策懇談会編: 海生生物汚損対策マニュアル, 技報堂出版, 1991年, p. 65.
- 4) 金子文夫, 橋本宏治: ポーラスコンクリートを利用した生物的水質浄化方法, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集, 1995年11月, pp. 67-70.
- 5) 岡田美穂, 片倉徳男, 金子文夫: 沿岸域の生物生息条件と水質浄化機能: 大成建設技術研究所報, 第31号, 1998年, pp. 49-52.
- 6) 善一章: 海洋構造物の腐食の実態と集中腐食対策, 港研報告15, No. 3, 1976年, pp. 190-191
- 7) 電気防食工業会編: 海洋生物と腐食・生物腐食と電気防食, 技術資料 No. 5-3.
- 8) 内海富士夫: 原色日本海岸動物図鑑, 保育社, 1979年12月, pp. 51-53.
- 9) 吉良哲明: 原色日本貝類図鑑 増補改訂版, 保育社, 平成8年.
- 10) 波部忠重: 続原色日本貝類図鑑, 保育社, 平成6年.
- 11) 内海富士夫監修: エコロン動物シリーズ 海岸動物, 保育社, 平成8年.
- 12) 北隆館編: コンパクト版17 原色日本動物図鑑, 北隆館, 平成7年.
- 13) E. BOURGET: Barnacle shells: Composition, structure and growth, Crustacean issues 5, barnacle Biology ed. by A. J. Southward, A. A. BALKEMA, pp. 267-286.
- 14) 岡野桂樹, 伏谷伸宏: フジツボの着生機構, 生化学第69巻第12号, 1997年, pp. 1347-1360.
- 15) 日本海洋学会編: 沿岸環境調査マニュアルII, 水質・微生物編, 1990年.
- 16) 原田佳幸, 阿部正美, 福手勤, 濱田秀則, 是永正, 江田和彦, 岩倉肇, 元木卓也, 佐藤一昌: 重防食鋼矢板における被覆材の接着耐久性に関する研究, 港湾技研資料, No. 984, 2001年.
- 17) 日本防食工業(株): 腐食防食データ集, 1991年.
- 18) 阿部正美, 横井聰之, 大即信明, 山本邦夫: 港湾鋼構造物の腐食調査資料, 港湾技研資料, No. 628, 1988年.
- 19) 熊本日日新聞, 平成12年7月28日
- 20) 村上和男, 小笹博昭, 大内久夫, 矢島道夫, 浅井正: コンクリート構造物に着生する付着生物に関する調査, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集, 1995年11月, pp. 111-116.
- 21) E. SAKAI, et. al.: Use of mineral admixtures for marine structures under tropical climatic conditions. (投稿中)
- 22) 石田信一, 鈴木哲緒: 硫酸第一鉄 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) を利用した藻礁の実験結果について, 水産土木 21(1), 1984年. pp. 25-28.
- 23) 広田信義: 着藻塗料, 塗装技術, 1984年10月増刊, pp. 285-288.
- 24) 山路勇: 日本海洋プランクトン図鑑第3版, 保育社, 平成8年.
- 25) コンクリート工学協会編: JCI-SC4 硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法, コンクリート構造物の腐食・暴食に関する試験方法ならびに基準(案), 1987年.
- 26) 大即信明, 久田真, 大谷隆之, 丸山俊夫: 電気泳動実験によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計, 土木学会論文集, No. 592/V-39, 1998年5月, pp. 97-105.
- 27) T. SUGIYAMA, Y. TSUJI and T. W. BREMNER: Relationship between coulomb and migration coefficient of chloride ions for concrete in a

steady-state chloride migration test, Magazine of Concrete Research, No. 53, 2001年2月, pp. 13-24.

- 28) 藤嶋昭, 相澤益男, 井上徹: 電気化学測定法(下), 技報堂出版, 1984年11月, pp. 271-277.
- 29) 小林和夫, 宮川豊章, 久米生泰: 耐久性設計の手法に基づいた鉄筋コンクリート部材の表面処理効果の評価, 土木学会論文集 第390号/V-8, 1988年2月, pp. 151-160.
- 30) M. STERN and L. GEARYA: Electrochemical polarization I. A theoretical analysis of shape of polarization curves, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 104, No. 1, 1957年.
- 31) 土木学会編: コンクリート技術シリーズ40鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2), 2000年, pp. 88-92.
- 32) 日本規格協会: コンクリートの圧縮強度試験方法, JIS A 1108, 1999年.
- 33) 日本規格協会: 金属材料引張試験方法, JIS Z 2241, 1998年.
- 34) 日本規格協会: コンクリートの静弾性係数試験方法, JIS A 1149, 2001年.
- 35) 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, 1988年9月.
- 36) 岩波光保, 横田弘, 秋本孝: 内部鉄筋が腐食したRCはりの力学性能評価のための非破壊調査手法の適用性, 港湾技研資料, No. 978, 2000年12月.
- 37) 丸屋剛, Somnuk TANGTERMSIRIKUL, 松岡康訓: コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化, 土木学会論文集No. 585/V-38, 1998年2月, pp. 79-94.
- 38) 土木学会編: コンクリート標準示方書[維持管理編], 平成14年.
- 39) 森敬介: 小型生物によるフジツボ空き殻の利用, 第11回日本ベントス学会講演要旨集, 1997年, p. 62.

図C.1 ひび割れ図

図C.2 主筋腐食状況図

## 付録

### 付録A バイオフィーム着生試験結果

表A.1 観察された代表的なバイオフィーム

### 付録B 暴露供試体の生物付着状況

写真B.1 大型RC梁供試体(200×300×2400mm)

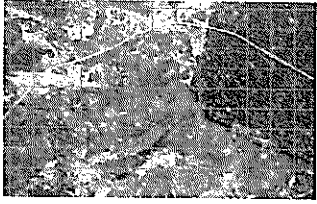
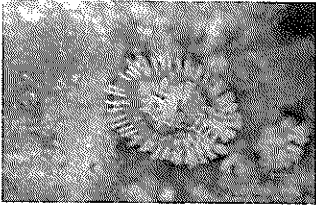
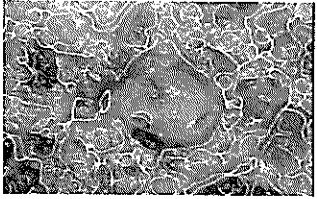


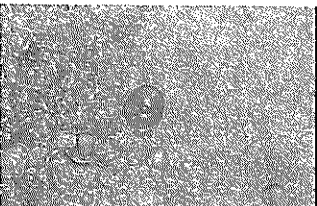
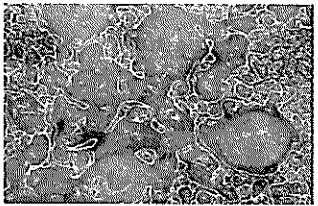


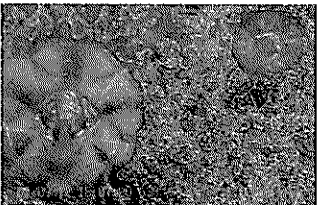


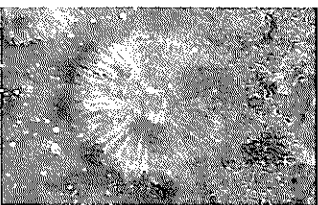

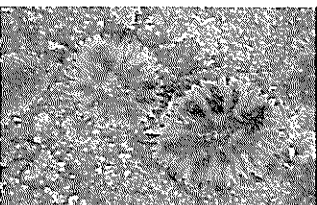
写真B.2 小型RC供試体(100×100×400mm)

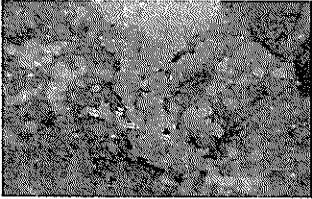
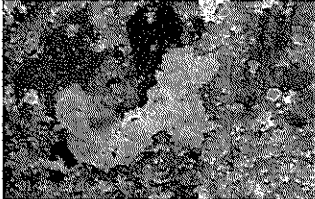

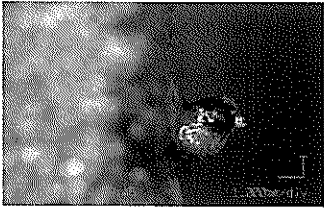
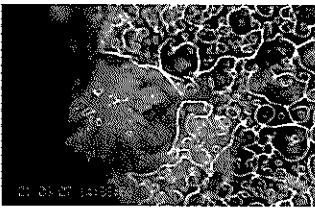
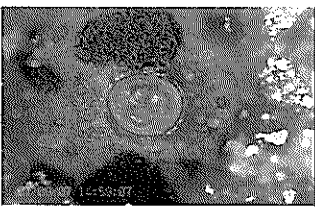
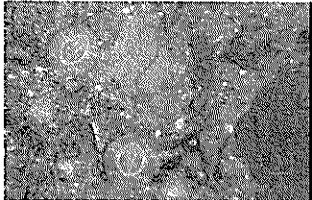
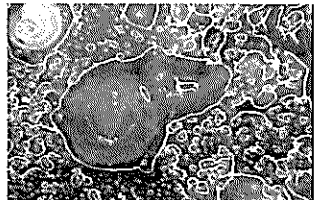
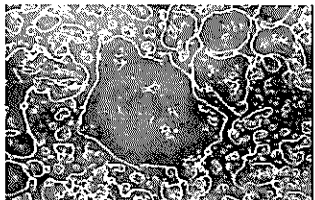
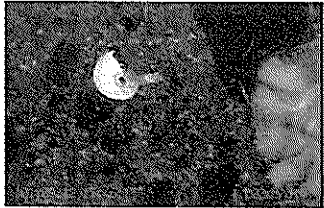

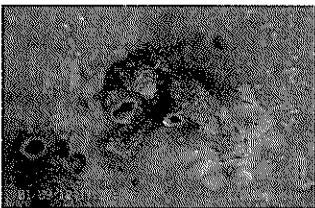

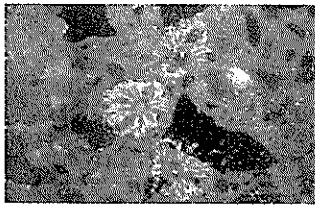
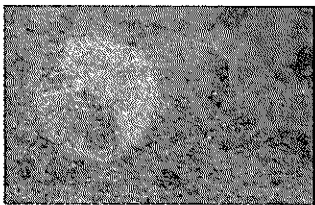
写真B.3 大型RC梁供試体ひび割れ閉塞状況

### 付録C 大型RC梁供試体曲げ載荷試験結果

付録A バイオフィルム着生試験結果

表A.1 観察された代表的なバイオフィルム

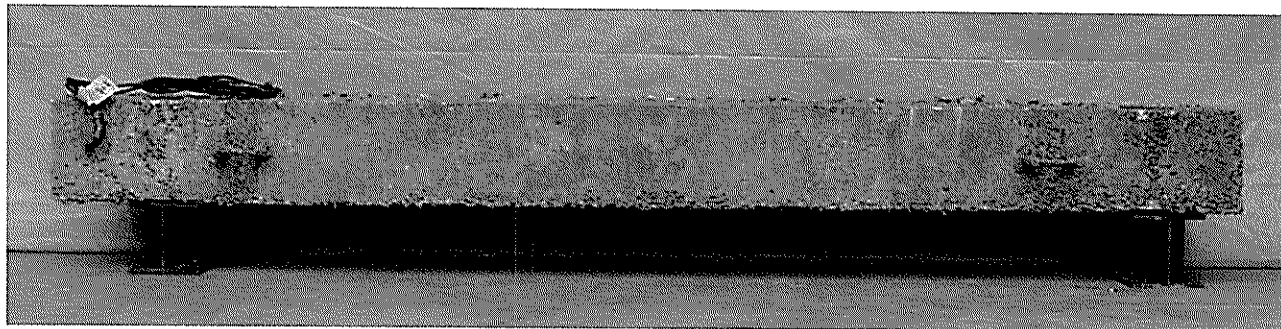
	A	B	C
1 日 目	観察されず	観察されず	
2 日 目	観察されず		
3 日 目			
7 日 目			
14 日 目			
23 日 目			

	D	E	F
1 日 目	観察されず	観察されず	観察されず
2 日 目			
3 日 目			
7 日 目			
14 日 目			
23 日 目			

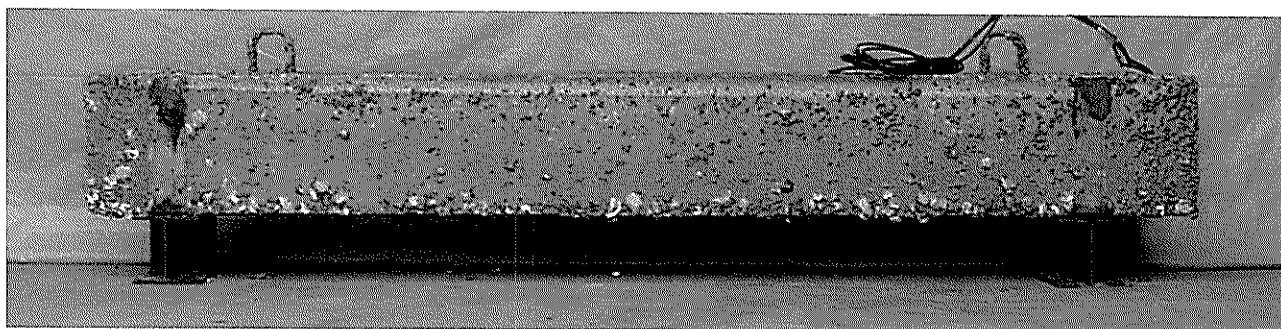
付録B 暴露供試体の生物付着状況

写真B.1 大型RC梁供試体 (200×300×2400mm)

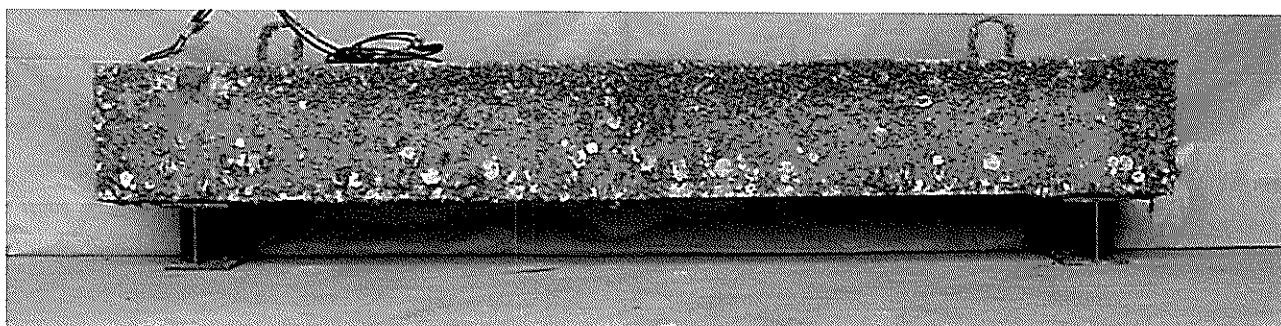
【本渡港 基本供試体 H1】



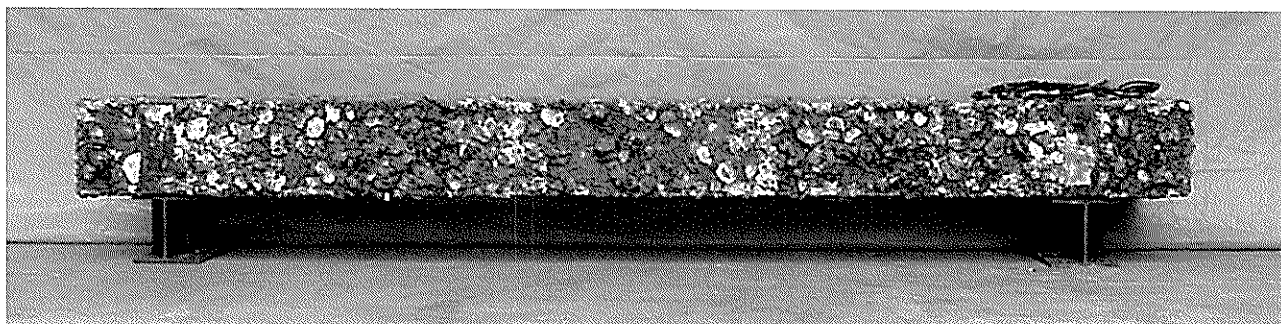
上面



海面



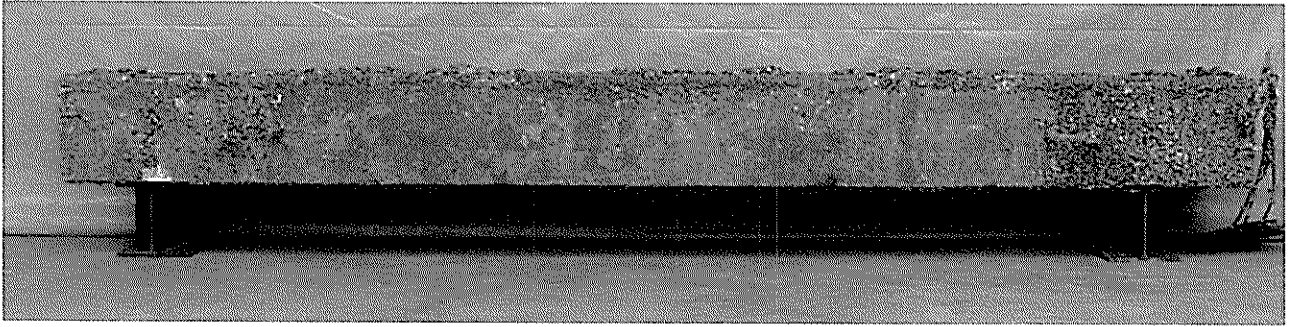
岸壁面



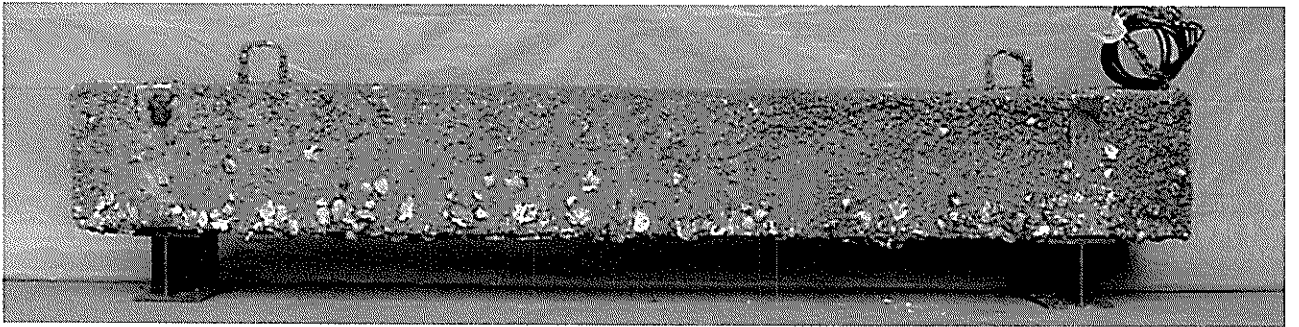
底面



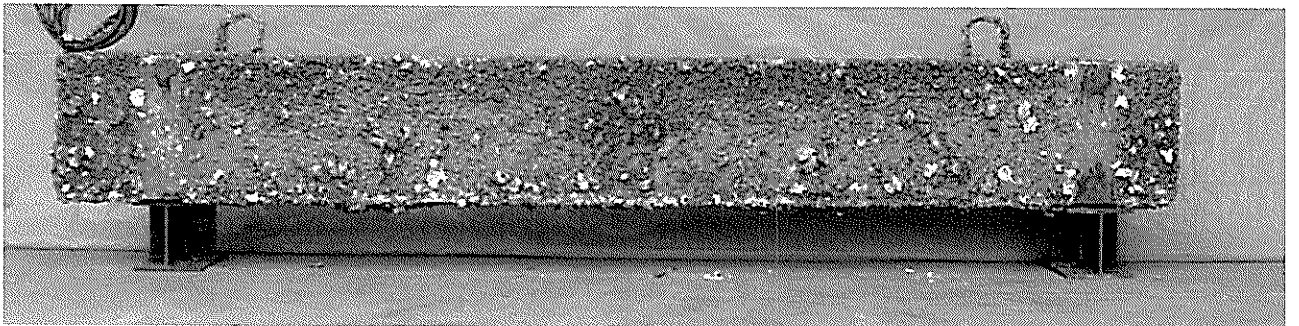
【本渡港 スリット 0.1mm 供試体 H2】



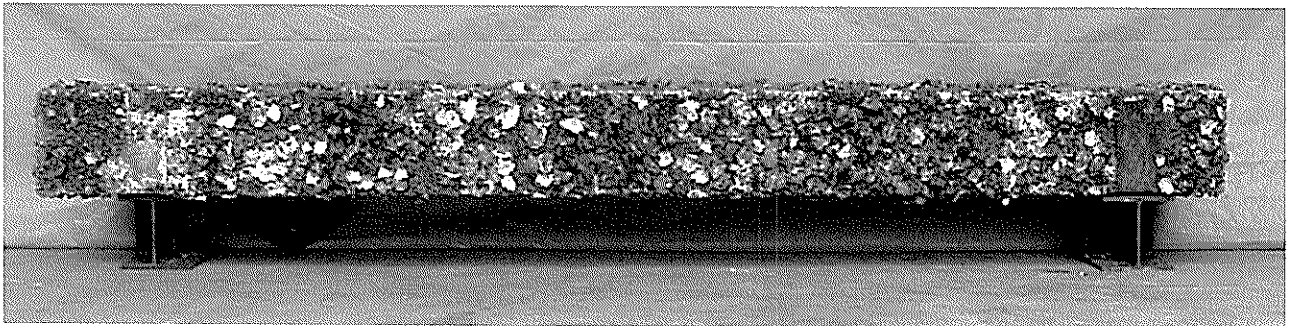
上面



海面

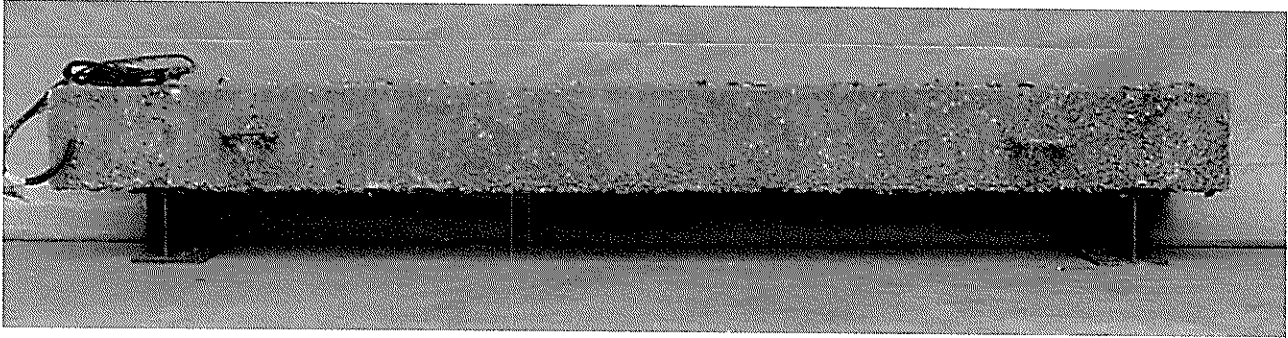


岸壁面

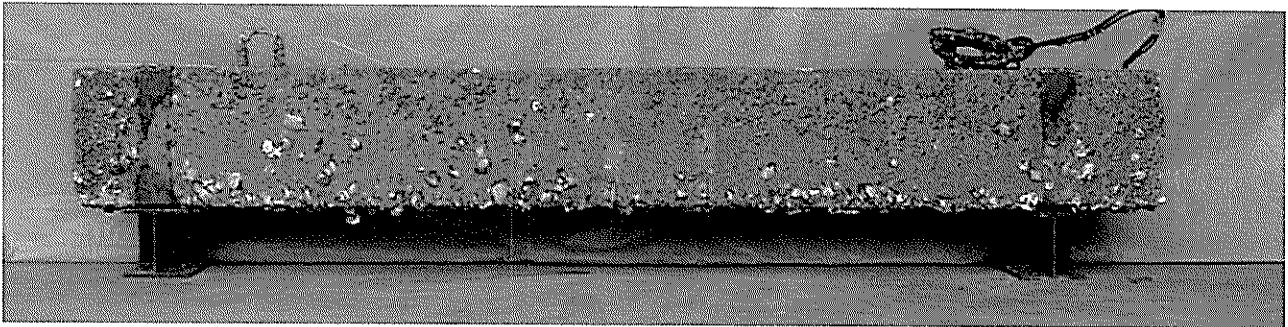


底面

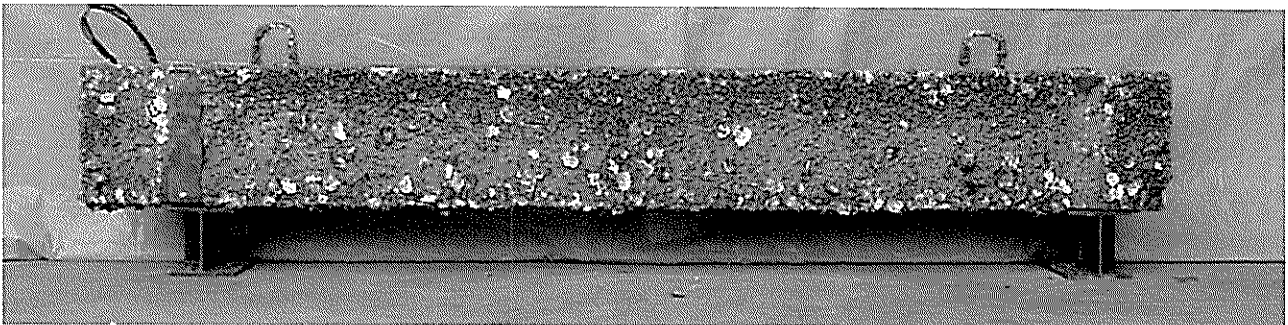
【本渡港 スリット 0.3mm 供試体 H3】



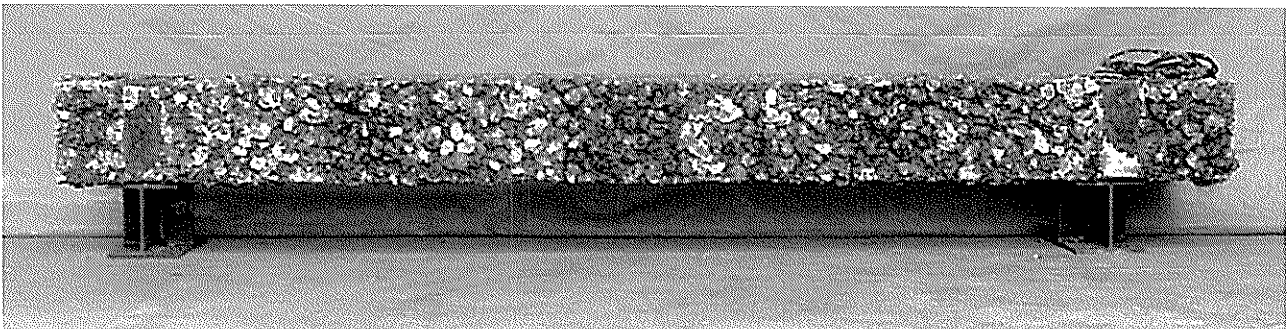
上面



海面



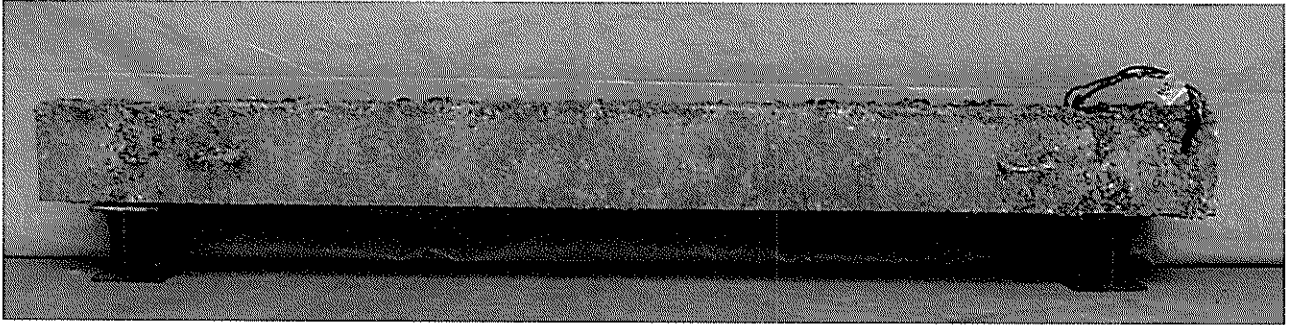
岸壁面



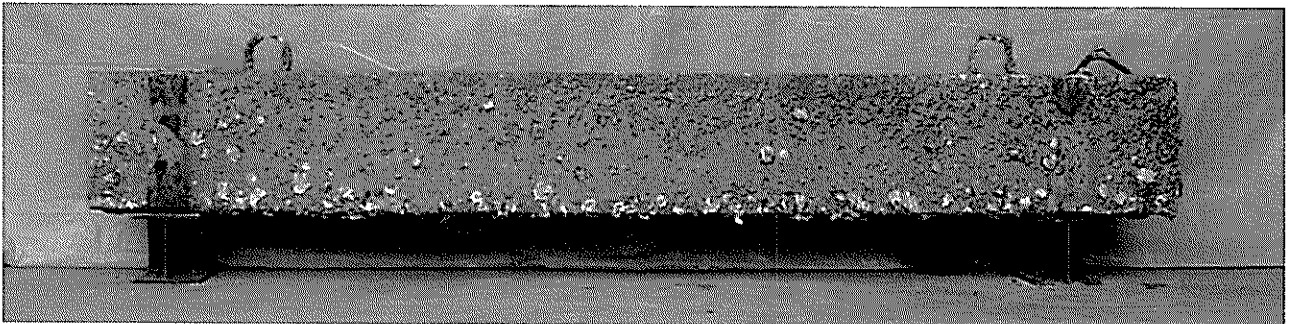
底面



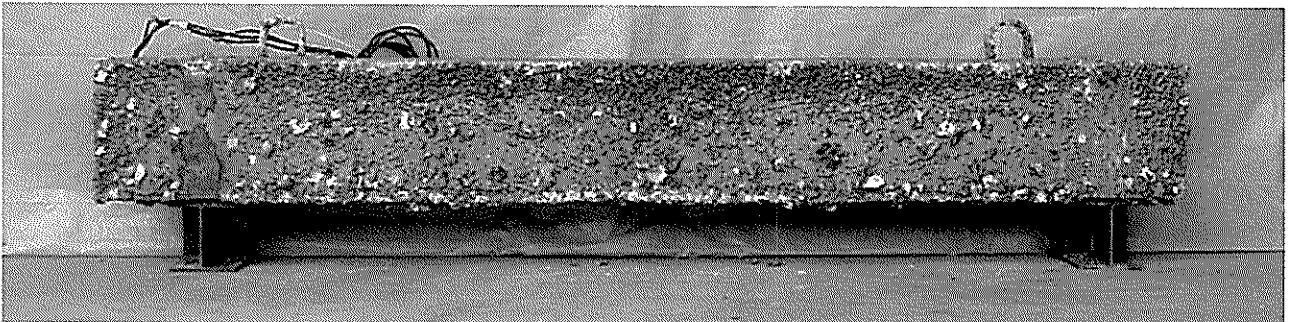
【本渡港 かぶり小供試体 H4】



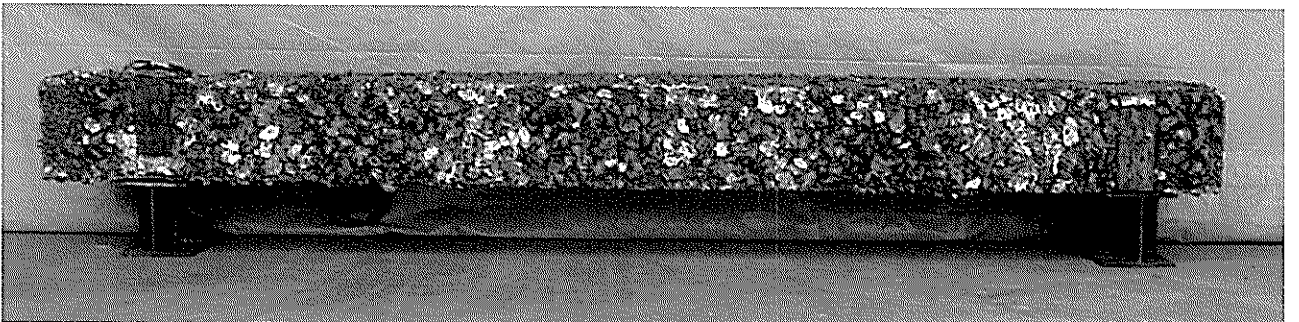
上面



海面



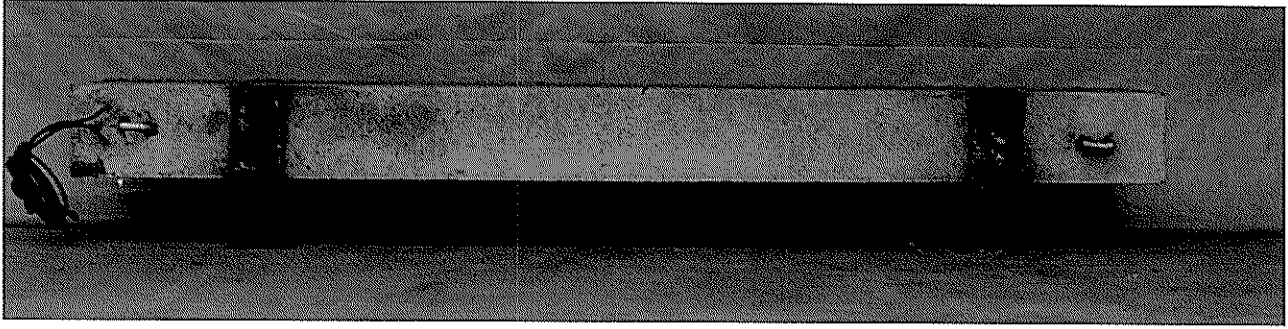
岸壁面



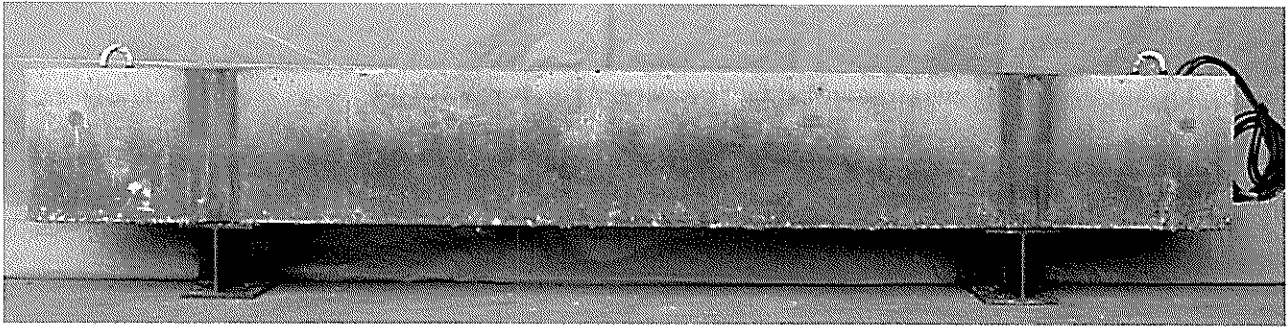
底面



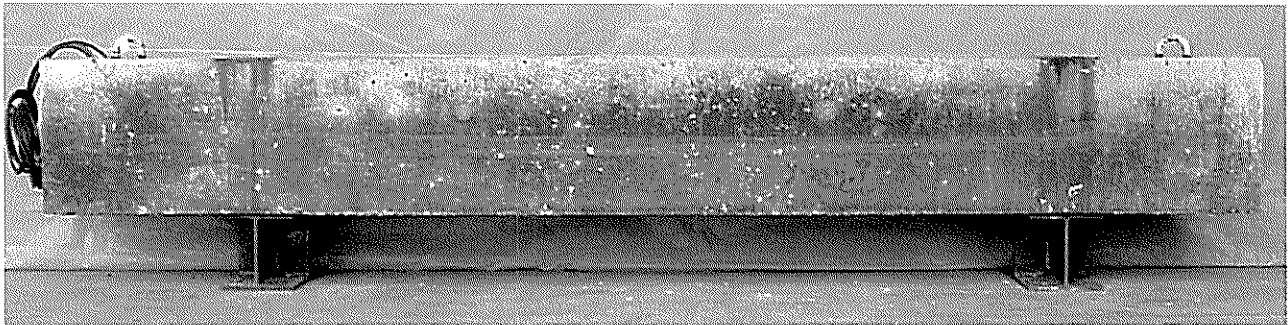
【清水港 基本供試体 S1】



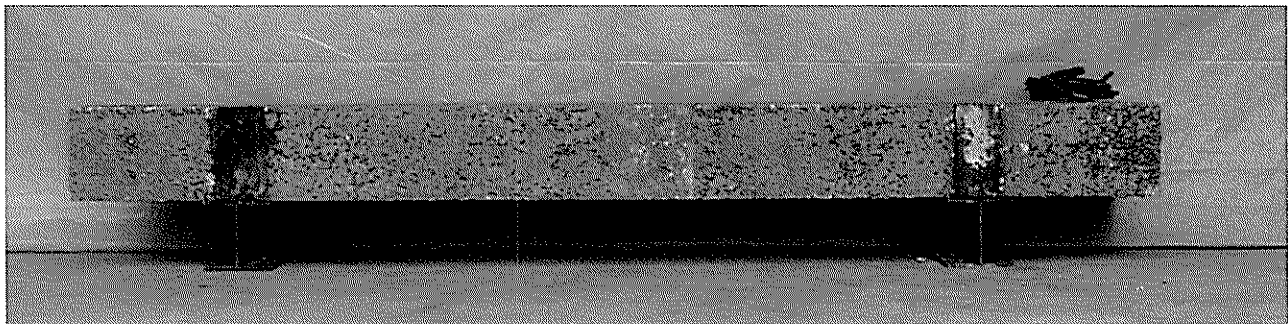
上面



海面

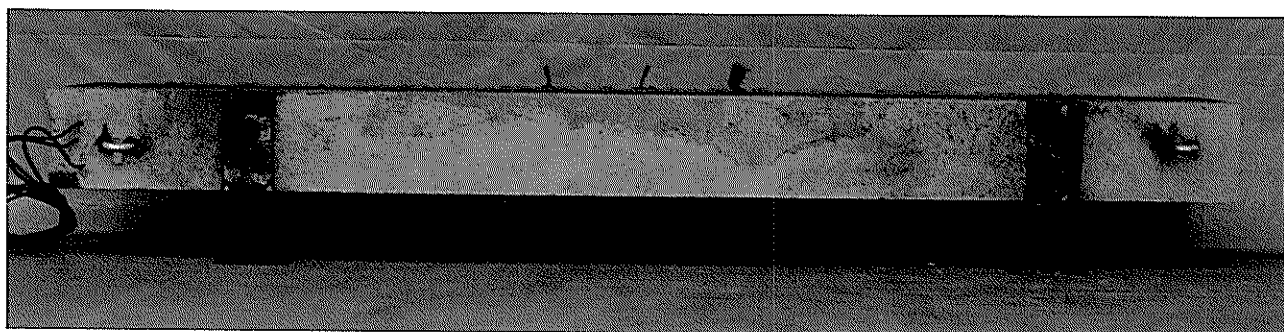


岸壁面

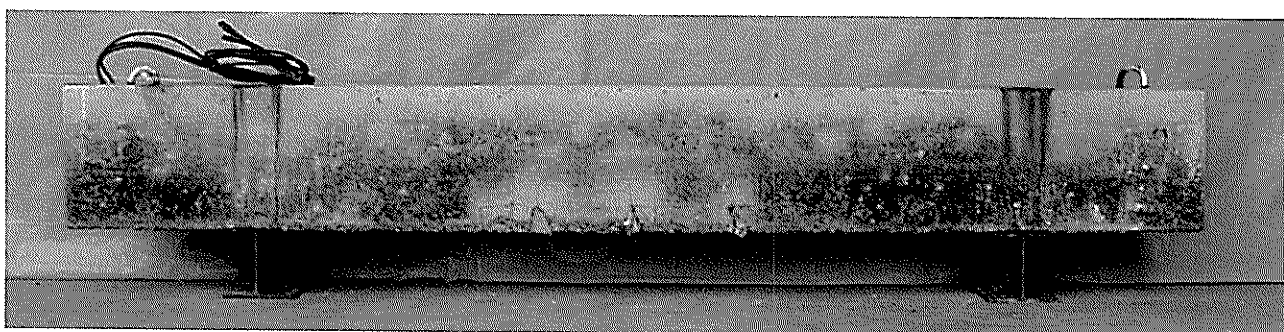


底面

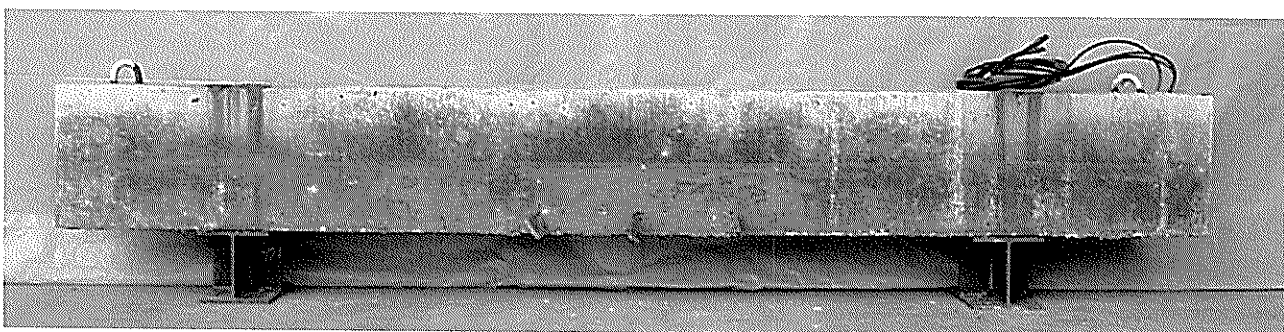
【清水港 スリット 0.3mm 供試体 S2】



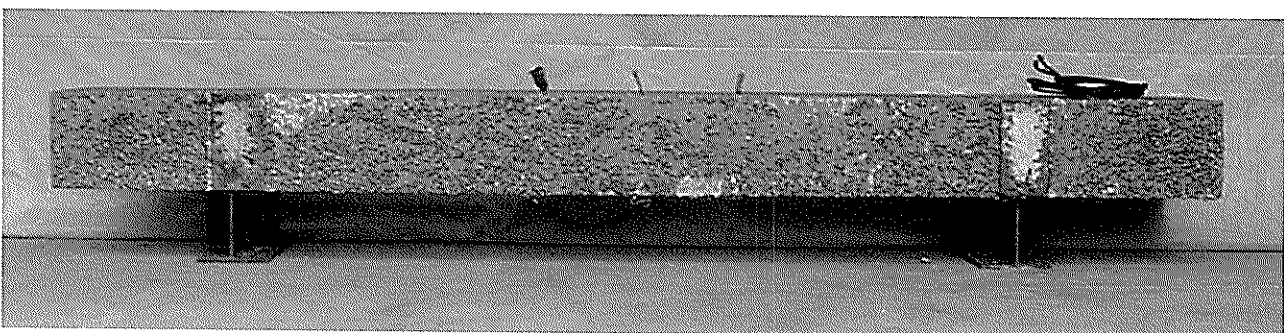
上面



海面



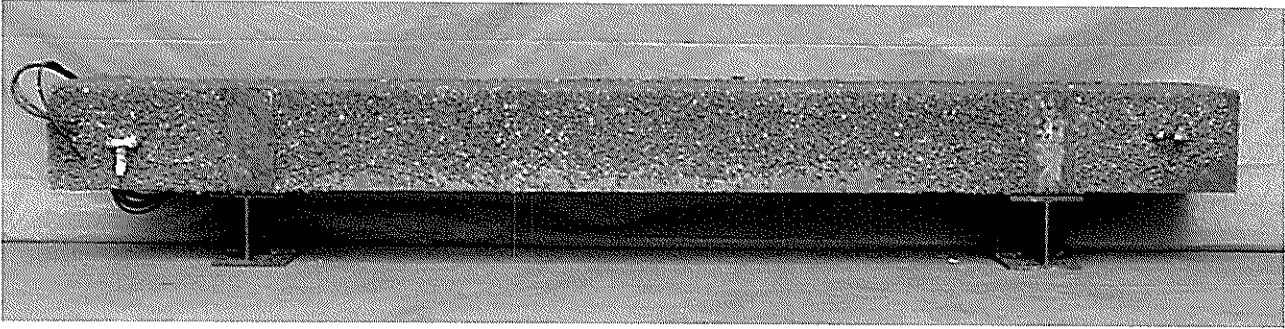
岸壁面



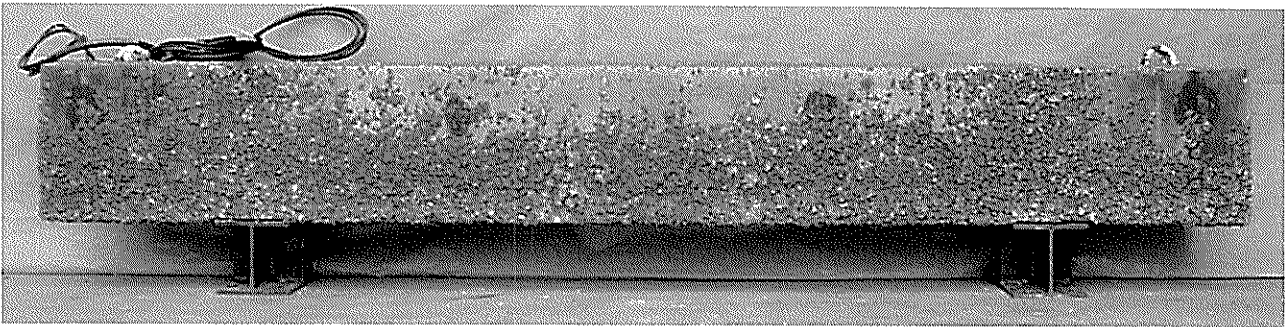
底面



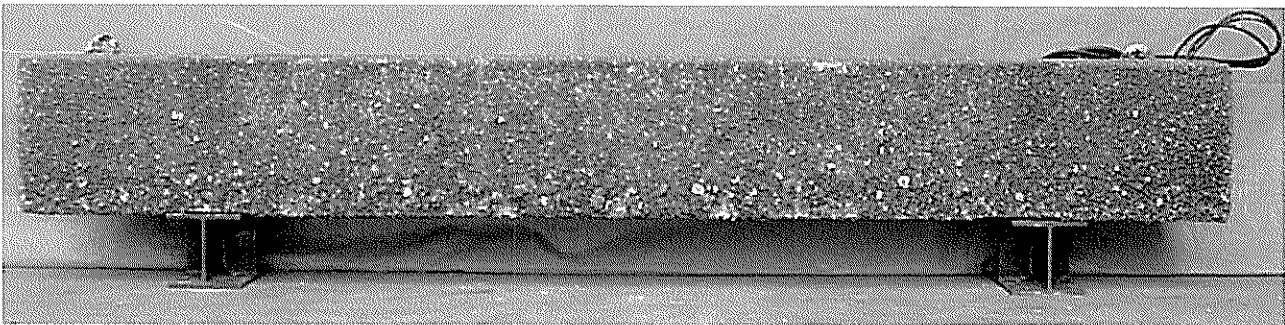
【清水港 電食軽微供試体 S3】



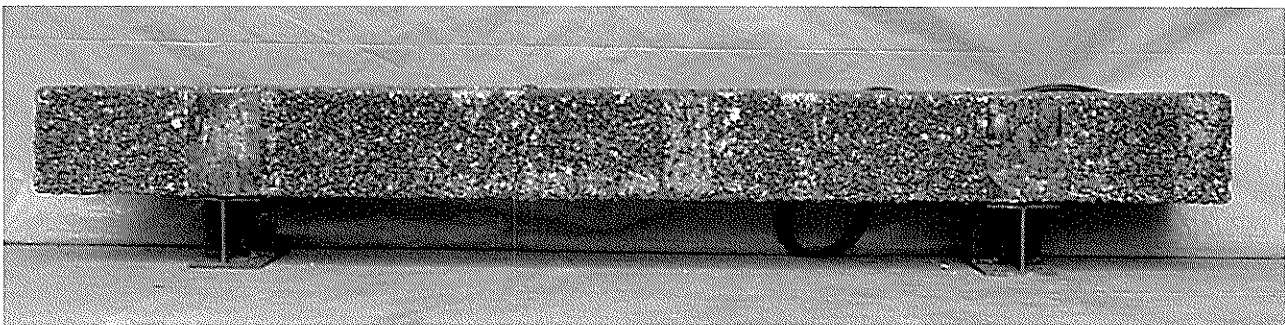
上面



海面

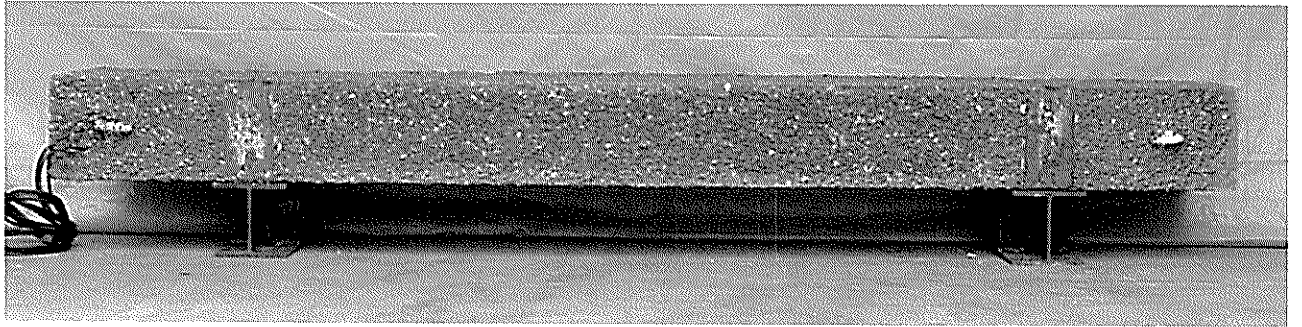


岸壁面

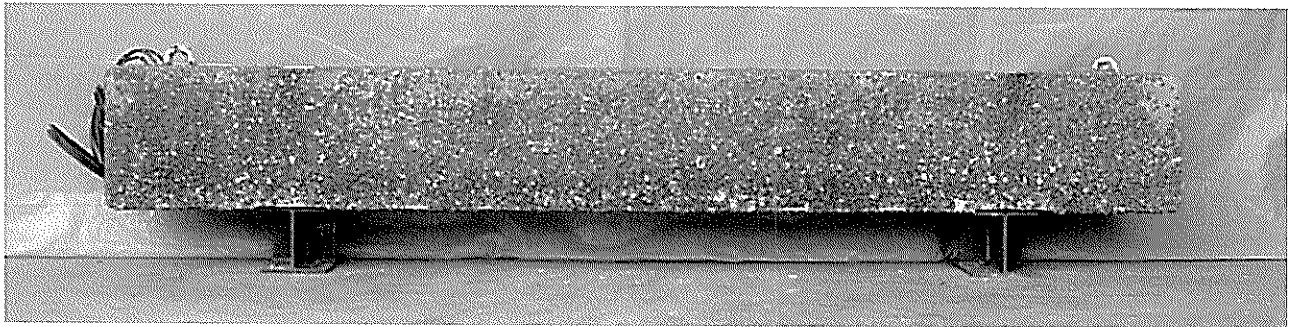


底面

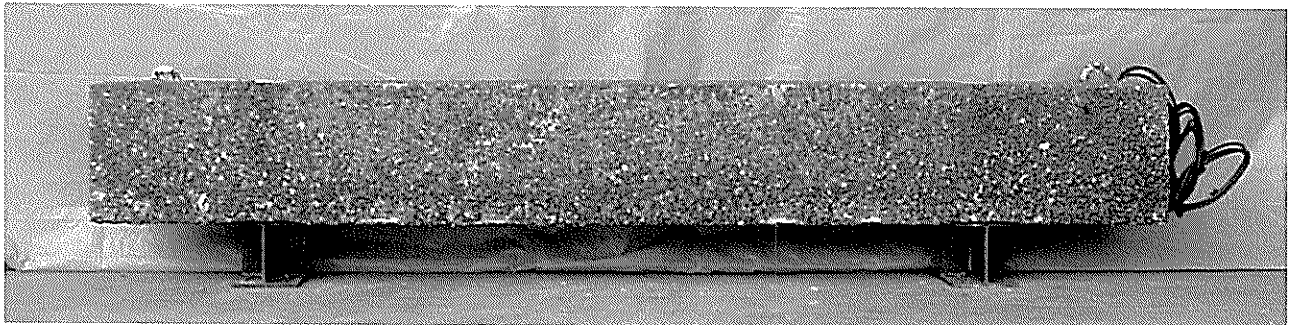
【清水港 電食重度供試体 S4】



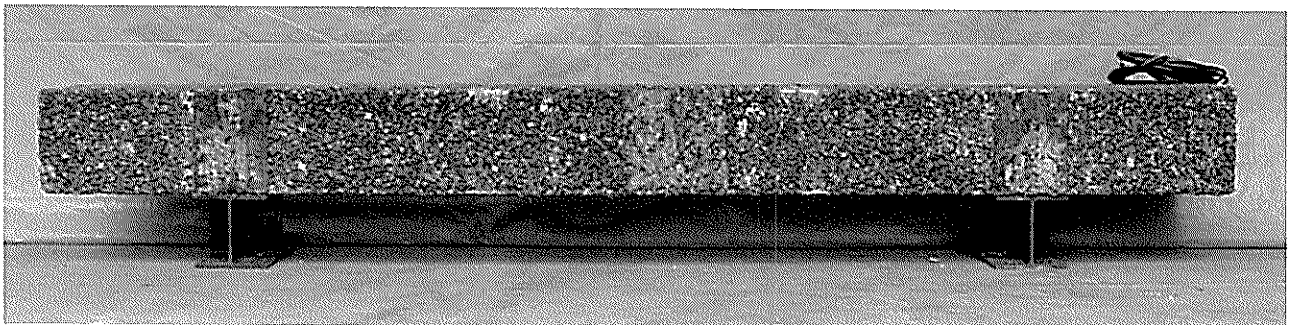
上面



海面



岸壁面



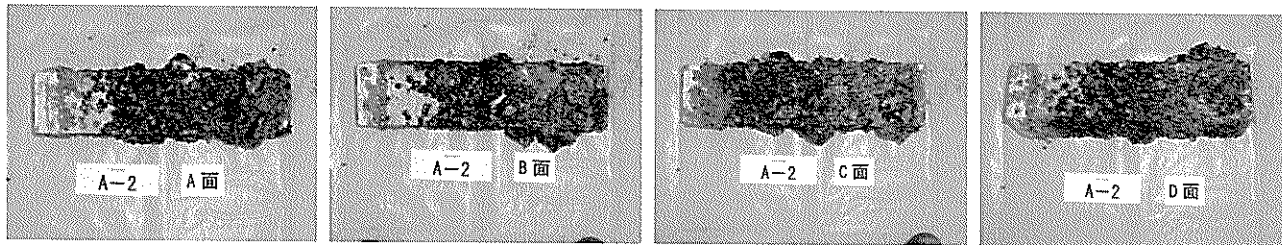
底面



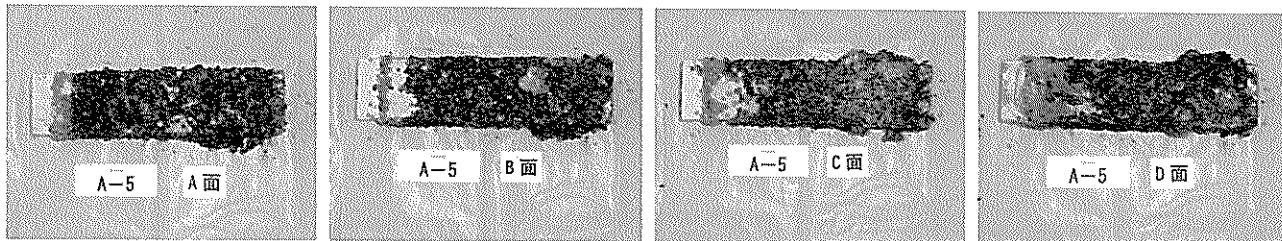
写真B.2 小型RC供試体 (100×100×400mm)

A面：海側 B面：外洋側 C面：岸壁側 D面：岸側

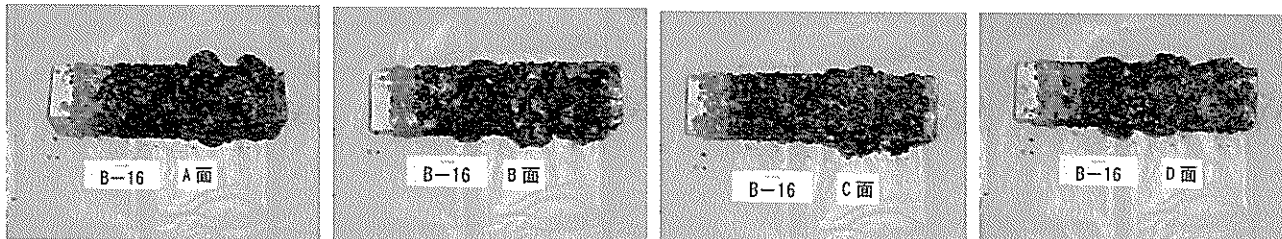
【清水港 A配合 ひび割れなし】



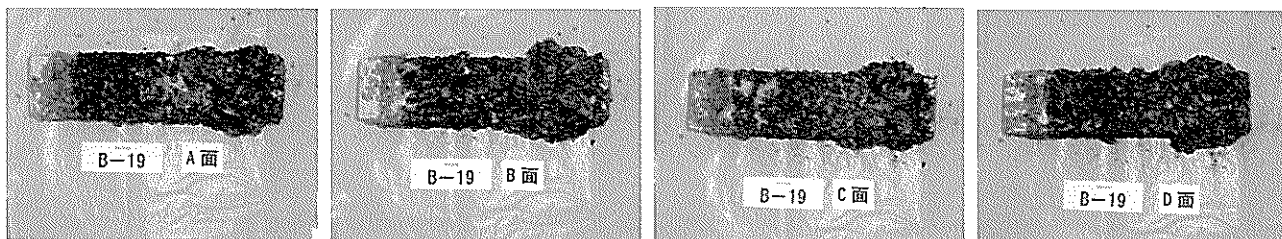
【清水港 A配合 ひび割れあり】



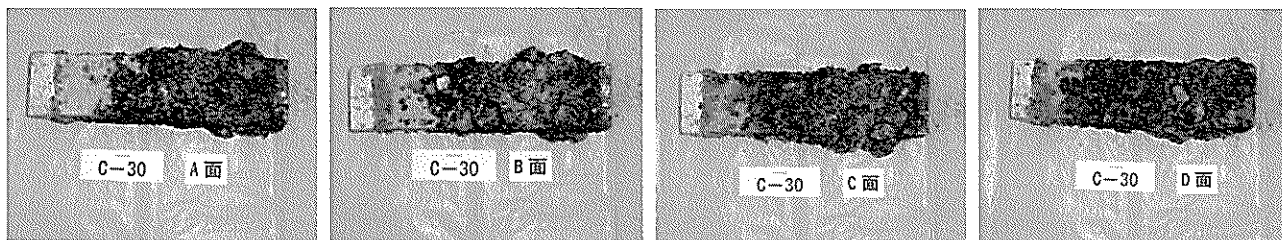
【清水港 B配合 ひび割れなし】



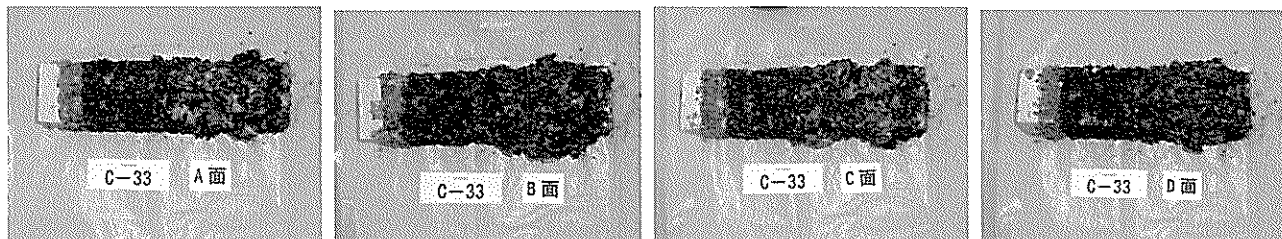
【清水港 B配合 ひび割れあり】



【清水港 C配合 ひび割れなし】

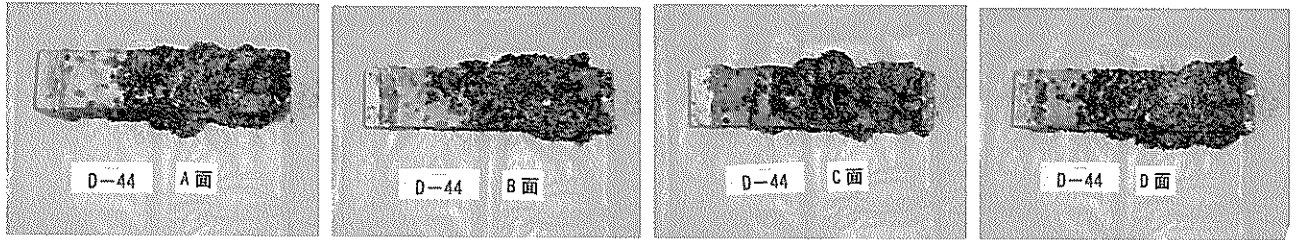


【清水港 C配合 ひび割れあり】

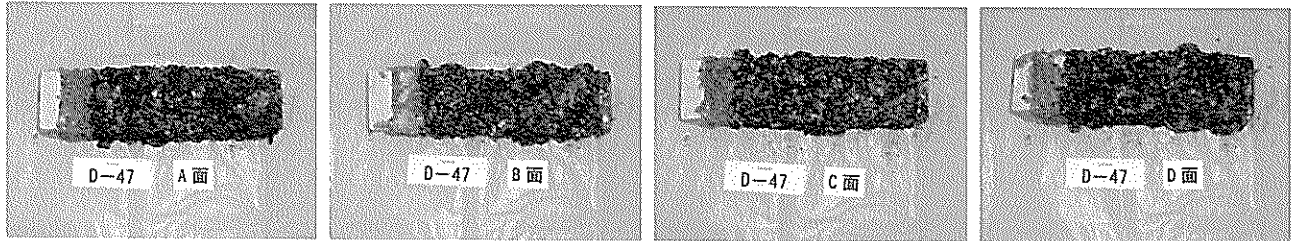


A面：海側 B面：外洋側 C面：岸壁側 D面：岸側

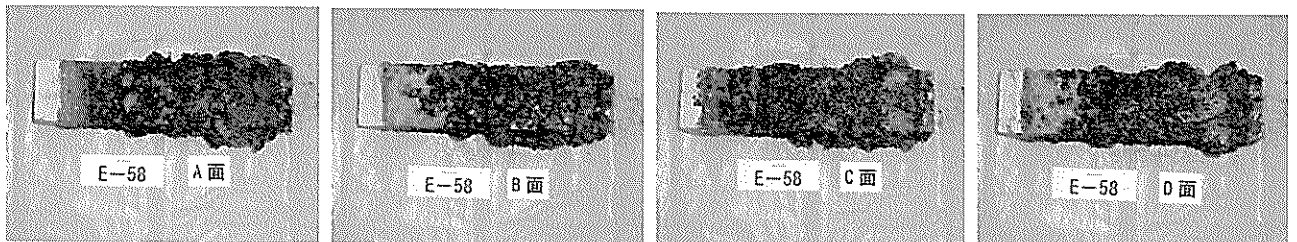
【清水港 D配合 ひび割れなし】



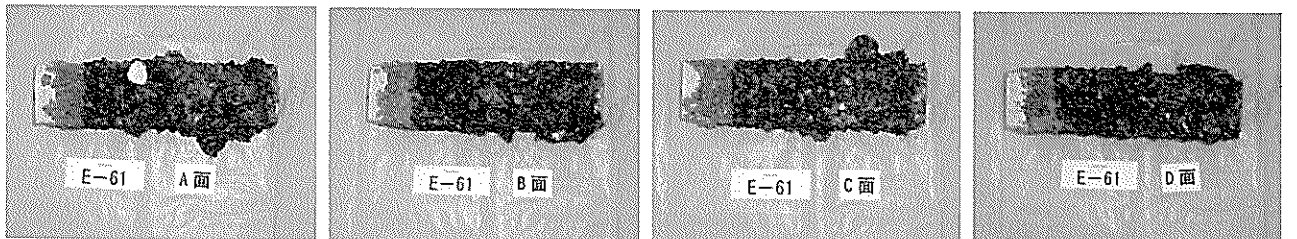
【清水港 D配合 ひび割れあり】



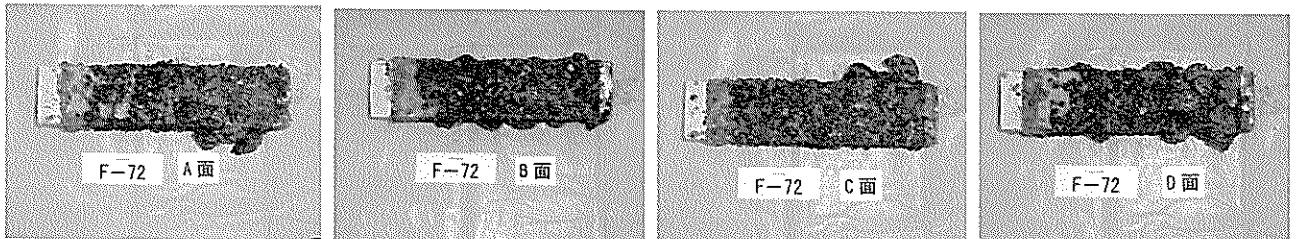
【清水港 E配合 ひび割れなし】



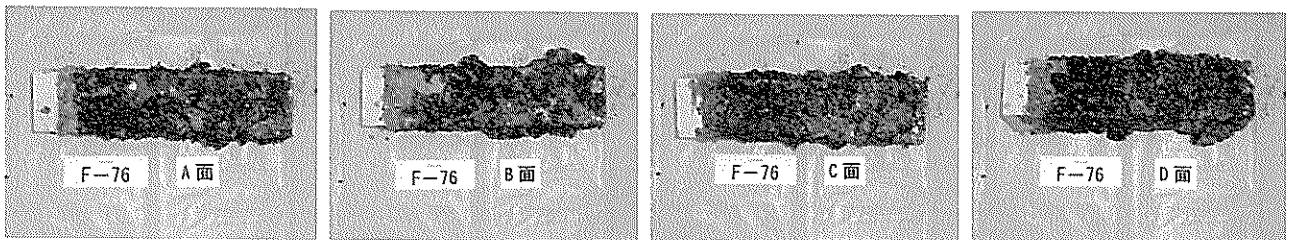
【清水港 E配合 ひび割れあり】



【清水港 F配合 ひび割れなし】

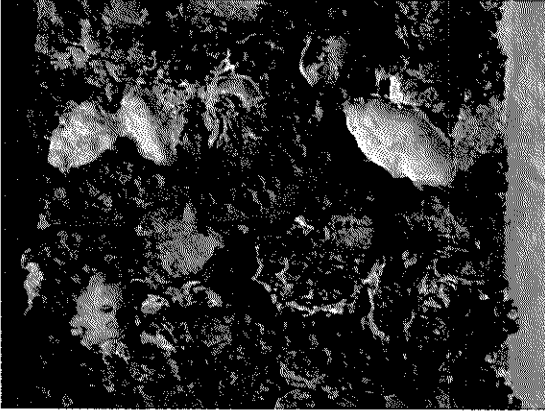


【清水港 F配合 ひび割れあり】



写真B.3 大型RC梁供試体ひび割れ閉塞状況

【本渡 0.1mm】

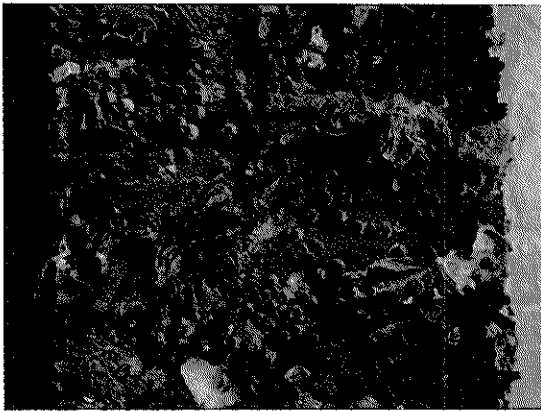


ひび割れ閉塞率 62.0%  
腐食面積率 60.5%

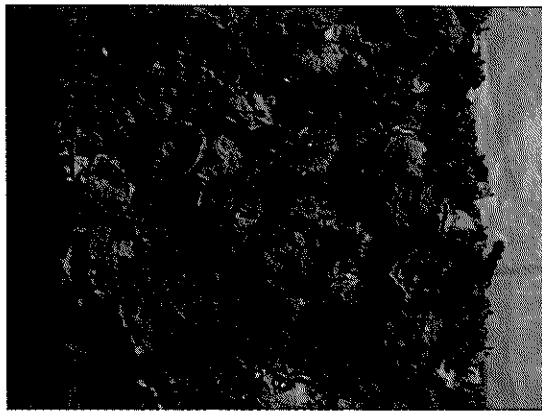
【本渡 0.3mm】



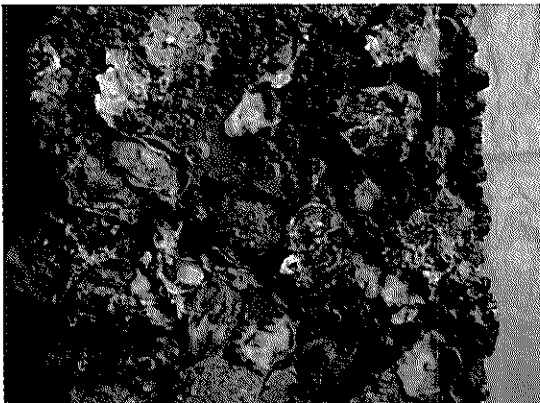
ひび割れ閉塞率 85.9%  
腐食面積率 20.8%



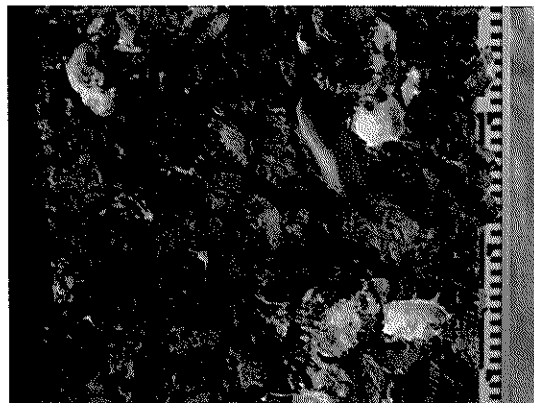
ひび割れ閉塞率 48.5%  
腐食面積率 26.9%



ひび割れ閉塞率 58.6%  
腐食面積率 25.0%



ひび割れ閉塞率 64.5%  
腐食面積率 34.6%

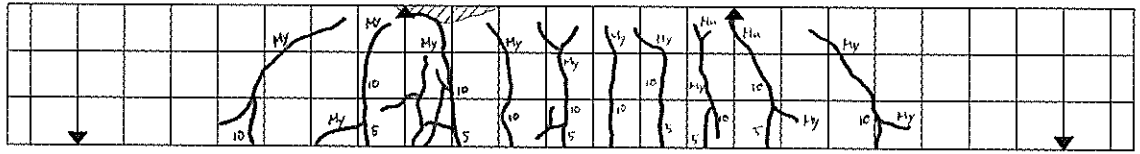


ひび割れ閉塞率 86.0%  
腐食面積率 28.3%

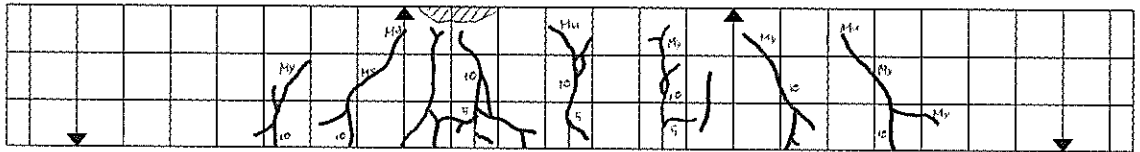
付録C 大型梁供試体曲げ載荷試験結果

図C.1 ひび割れ図

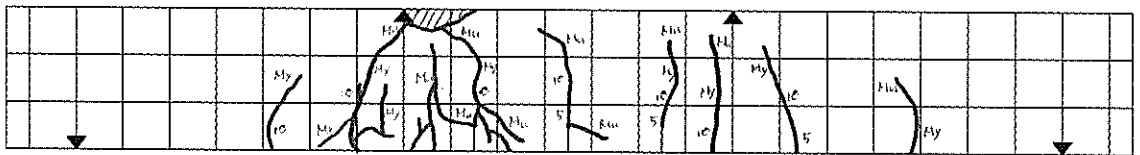
本渡港 基本供試体



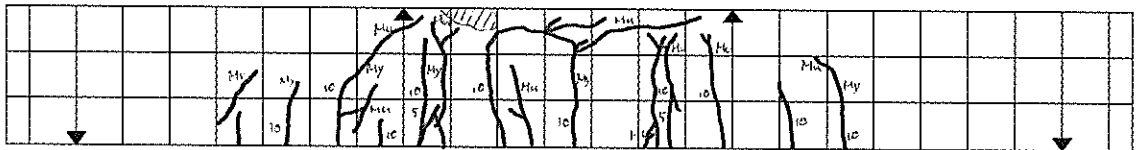
本渡港 スリット0.1mm供試体



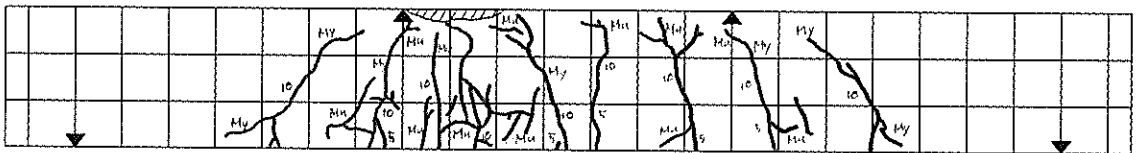
本渡港 スリット0.3mm供試体



本渡港 かぶり小供試体



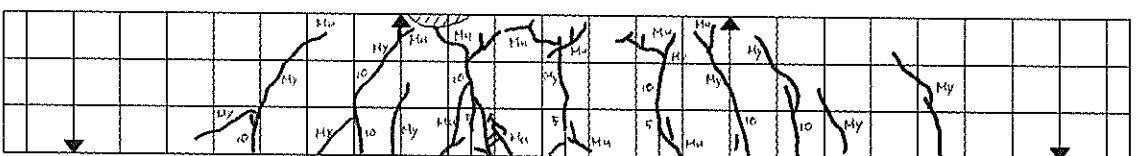
循環水槽 基本供試体



循環水槽 スリット0.1mm供試体



循環水槽 スリット0.3mm供試体

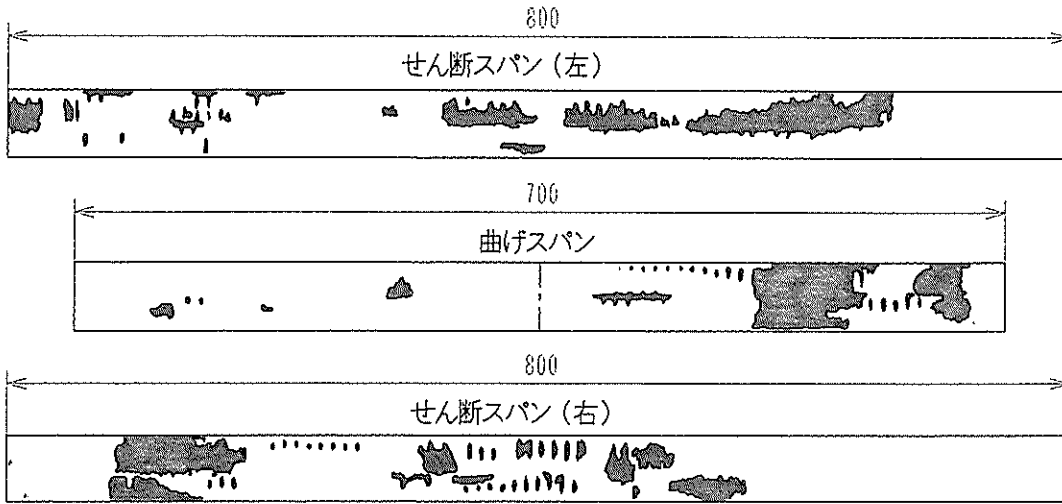




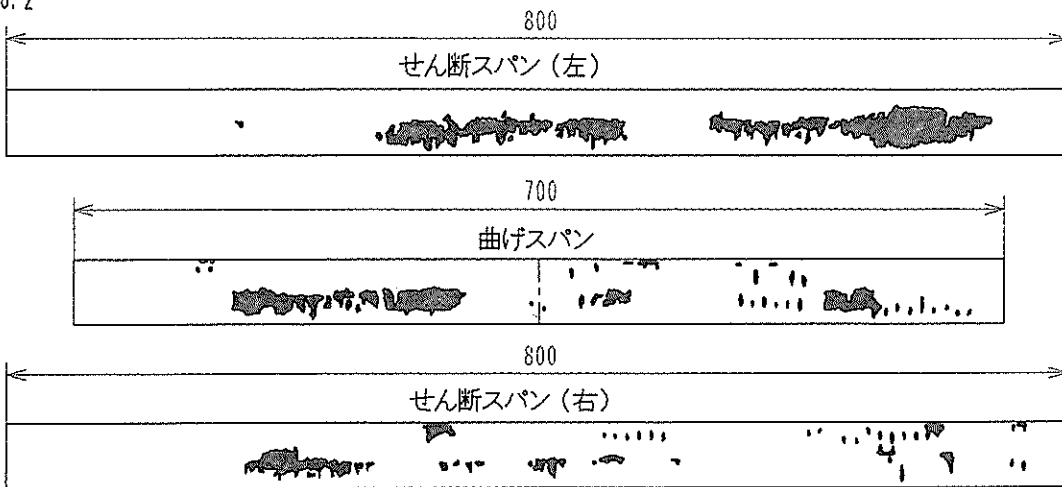
図C.2 主筋腐食状況図

本渡港 かぶり25mm供試体

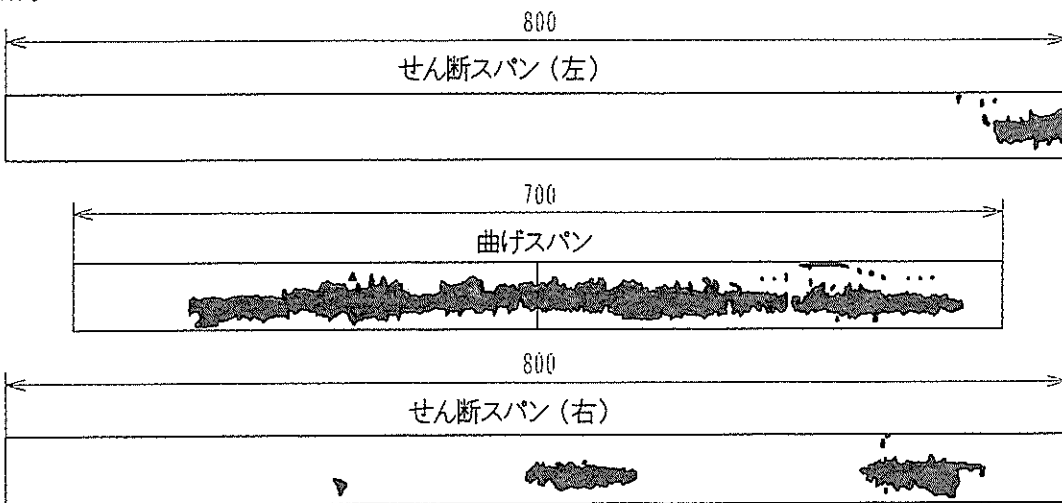
鉄筋No. 1



鉄筋No. 2

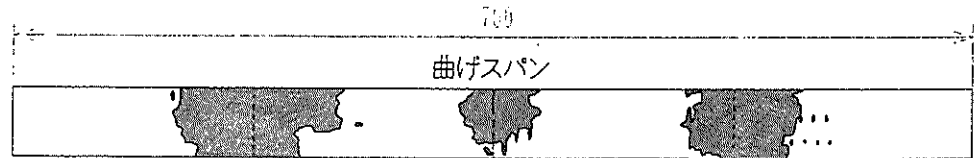


鉄筋No. 3

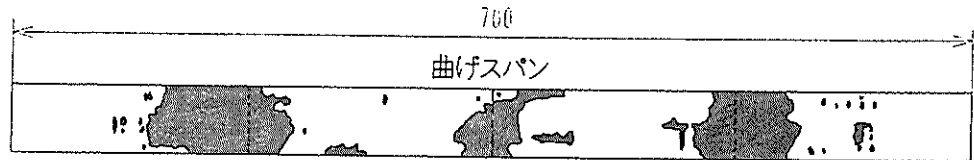


本渡港 スリット0.1mm供試体

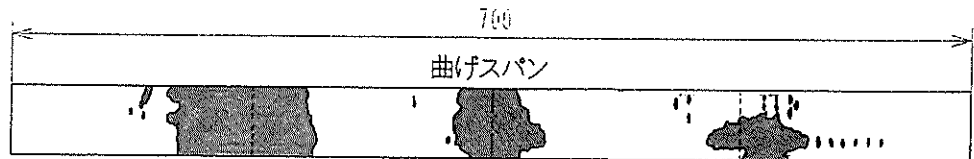
鉄筋No. 1



鉄筋No. 2

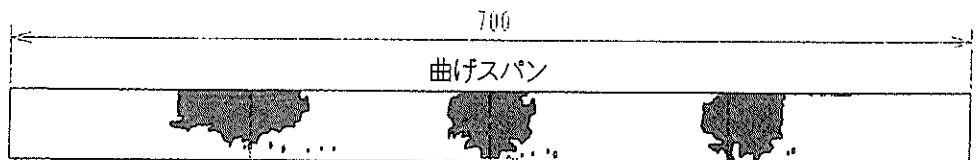


鉄筋No. 3

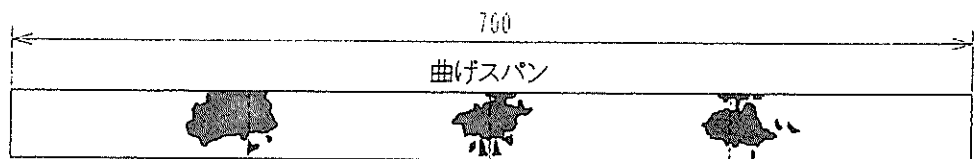


本渡港 スリット0.3mm供試体

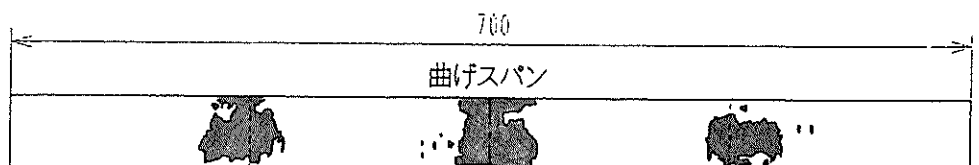
鉄筋No. 1



鉄筋No. 2

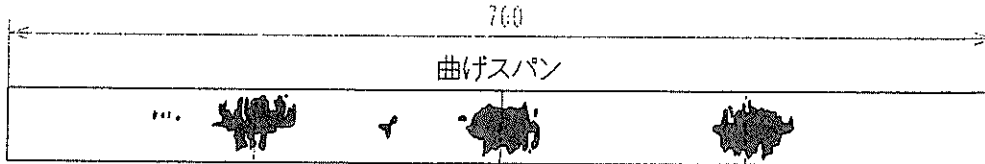


鉄筋No. 3

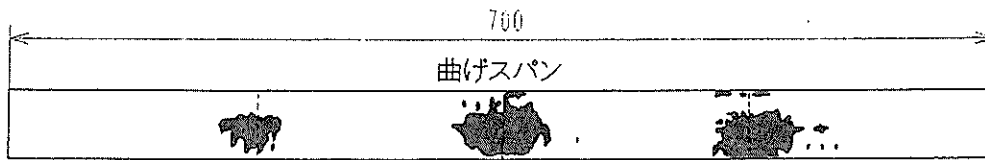


港研循環水槽 スリット0.1mm供試体

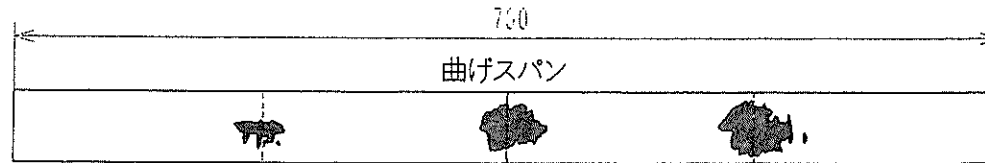
鉄筋No. 1



鉄筋No. 2



鉄筋No. 3

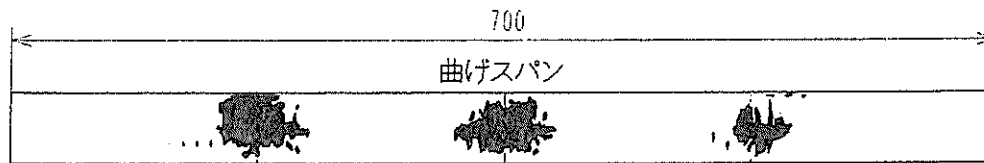


港研循環水槽 スリット0.3mm供試体

鉄筋No. 1



鉄筋No. 2



鉄筋No. 3

