

論文 海生生物付着による海洋構造物の耐久性向上について

濱田 秀則*1・岩波 光保*2・丸屋 剛*3・横田 弘*4

要旨：海洋コンクリート構造物の表面への海生生物の付着が、構造物の耐久性向上に及ぼす効果を明らかにすることを試みた。実海洋環境下に約2年間暴露した供試体を用いた試験の結果、コンクリート表面に付着した海生生物がその緻密な付着層により、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。また、生物付着という要因を性能設計手法に取り入れ、構造物の耐久性に及ぼす効果を定量的に評価することを試みた。

キーワード：海洋構造物，耐久性，海生生物，塩化物イオン，鉄筋腐食，性能設計

1. はじめに

海洋構造物は、陸上構造物に比べて高濃度の塩分環境下に曝されており、内部鉄筋腐食の観点からは厳しい環境下にあるといえる。一方、干満帯および海中部に位置する海洋構造物では、コンクリート表面に多くの海生生物が付着することが知られている。

そこで本研究では、構造物表面に付着した海生生物による、コンクリート構造物の内部鉄筋腐食の抑制効果の有無およびその効果の定量的把握を行うための検討を行った。また、その結果を性能設計に取り入れ、生物付着が構造物の耐久性向上に及ぼす効果を定量的に表現することを試みた。

2. 試験の概要

2.1 暴露場所

コンクリート表面に海生生物を付着させるため、コンクリート供試体を実海洋環境下に約2年間暴露した。暴露場所は、自然環境が異なる地点という観点から、潮位変動の小さい静岡県清水港と、国内で最も潮位変動が大きい有明海に面した熊本県本渡港の2港を、事前調査で実構造物への生物付着状況を確認した上で選択し

た。また、海水暴露や日射等の影響は実海洋環境と同じであるが、海生生物が付着しない環境として、自然海水を取り入れ人工的に潮位変動を制御している港湾空港技術研究所の海水循環水槽を使用した。

2.2 供試体

暴露試験に用いた供試体は、100×100×400mmのコンクリート角柱とし、図-1に示すように供試体軸方向中央にみがき鉄筋(φ16mm)1本を埋設した。また、半数の供試体には、鉄筋腐食を促進させる目的で、曲げ載荷による初期ひび割れ(平均残留ひび割れ幅約0.2mm)を導入した。これらの供試体は表面に海生生物が付着しやすいよう、100×100mm面を底面として直立させた状態で暴露した。

2.3 コンクリートの配合

暴露試験に用いた供試体のコンクリート配合を表-1に示す。材料には、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末(粉末度4200cm²/g)、種フライアッシュ、エトリンナイト系高強度混和材、リグニン系AE減水剤を用いた。表-1に示す配合は、水結合材比、混和材の有無およびその種類、高強度混和材の有無を主要なパラメタとして設定した。

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室長 工博 (正会員)

*2 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造強度研究室 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 土木材工研究室 工博 (正会員)

*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造強度研究室長 工博 (正会員)

表 - 1 暴露試験に用いたコンクリートの配合

No.	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比	単位量(kg/m ³)							
					水	セメント	高炉スラグ	フライアッシュ	高強度混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
A	20	12	4.5	0.55	176	320	-	-	-	793	986	0.8
B	20	12	4.5	0.55	176	176	144	-	-	765	986	0.8
C	20	12	4.5	0.55	176	224	-	96	-	748	986	0.8
D	20	12	3.0	0.40	170	420	-	-	-	748	986	1.05
E	20	12	3.0	0.40	145	316	-	-	47	847	986	-
F	20	12	3.0	0.40	145	221	-	95	47	821	986	-

2.4 試験方法

(1) 付着生物の同定および生物付着量

専門図書¹⁾等により付着生物の同定を行った。その後、コンクリート表面より付着生物を除去してその湿潤質量を生物付着量とし、コンクリート表面に残った付着層の面積から付着面積率を算出した。その際、各試験に用いる供試体の被覆状況により1面あるいは上下面を除いた4面を対象とした。

(2) 塩化物イオン拡散係数

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、実際の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。そこで、本研究では電気泳動試験²⁾を行い、生物付着層を含めたコンクリートの見掛け上の拡散係数を求めた。

暴露試験に用いた供試体からは、図 - 1 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 の試験片を切り出し、生物付着面をカソード側セルに向けた。アノード側セルには Ca(OH)₂ 飽和水溶液を、カソード側セルには NaCl 5% 溶液を用い、両セル間に 15V の電圧を加えた。電気泳動によってカソード側セルからコンクリート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)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(cm²/s)、 u_{cl} : 電氣的移動

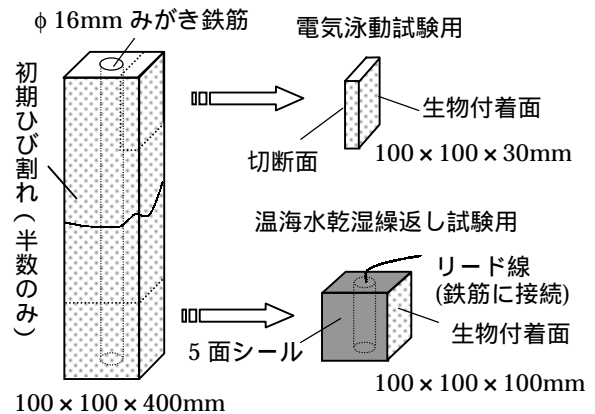


図 - 1 供試体概要

度(cm²/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

(3) 酸素拡散係数

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、電気化学的手法の一つである定電位ステップ試験³⁾を行った。

海水を満たした容器の中に供試体(100 × 100 × 400mm)を静置した状態で、鉄筋の電位を参照電極に対して - 1000mV に保持し、鉄筋と対極間を流れる電流を計測した。5 時間後、ほぼ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)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(cm²/s)、 δ : かぶり(cm)、 I : 限界電流(A)、 n : 原子価、 A : 電極面積(cm²)、 F : ファラデー定数(C/mol)、 C_b : 酸素濃度(mol/cm³)

(4) 鉄筋腐食速度

コンクリート中への塩化物イオン浸透およ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。

供試体は図 - 1 に示すように、中央に鉄筋が埋設される状態で切断し、鉄筋端部には自然電位およ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)を用いて腐食速度を算出した。

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

ここに、 V_{corr} :腐食速度(cm/y) ,

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

3. 試験結果および考察

3.1 付着生物の同定および生物付着量

付着生物の種類は、主にフジツボ類およびカキ類であった。清水港における暴露供試体への生物付着状況の一例を写真 - 1 に示す。フジツボ類は主に炭酸カルシウムを主成分とする付着層を生成してコンクリート表面に付着していると言われている^{4), 5)}。顕微鏡観察結果によると、写真 - 2 に示すように、生物付着層の組織はコンクリート表面のセメントペースト組織よりも緻密であった。したがって、生物付着層が生成されることで、コンクリート表面が見かけ上緻密になっていると考えられる。

暴露約2年後の生物付着量の測定結果を図 - 2 に示す。配合および初期ひび割れの有無による付着量の差は顕著ではなく、暴露場所の違いが大きく現れていた。本渡港において付着量が清水港よりも小さい理由は、暴露期間中に有明

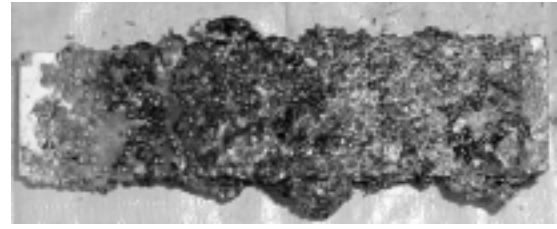


写真 - 1 生物付着状況の一例 (A 配合)

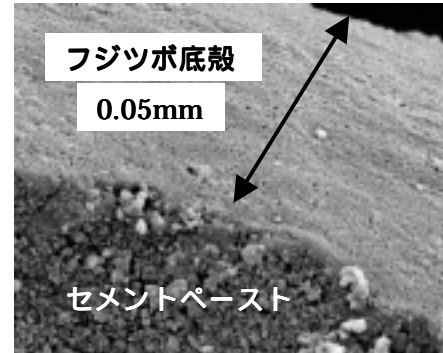


写真 - 2 フジツボの付着層

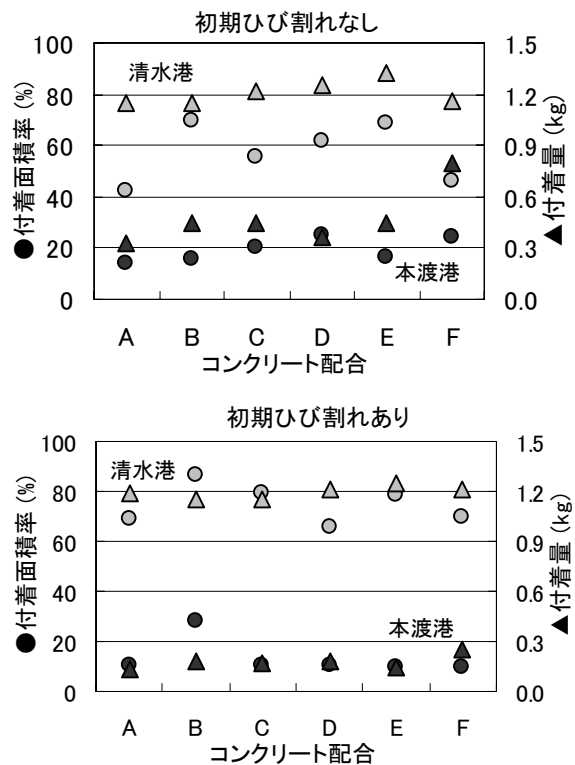


図 - 2 生物付着量測定結果

海で大規模に発生した赤潮の影響と考えられる。

3.2 塩化物イオン拡散係数

電気泳動試験結果より求めた塩化物イオン拡散係数の算出結果を図 - 3 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る。

図 - 4 に、塩化物イオン拡散係数と生物付着量との関係を示す。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可能性が考えられる。

特に、生物付着量が 30%程度までの場合には、付着がない場合の拡散係数と同程度の値であり、生物付着による拡散係数低減の効果が明確でないが、生物付着量が 70%以上になると、その低減効果は顕著に現れる。

3.3 酸素拡散係数

定電位ステップ試験結果より求めた酸素拡散係数の算出結果を図 - 5 に示す。初期ひび割れの有無による差が明確に表れており、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 および D 配合で、暴露場所すなわち生物付着量の影響が大きく表れる傾向にある。すなわち、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, F 配合では生物付着の影響が表れにくい、混和材を用いない配合ではその影響が表れやすいと考えられる。

図 - 6 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、生物付着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。しかし、その効果は塩化物イオン拡散の抑制効果ほど明確には示すことができなかった。

3.4 鉄筋腐食速度

温海水乾湿繰返し試験より求めた鉄筋腐食速度を図 - 7 に示す。鉄筋腐食速度は $0.05 \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{mm/y}$ の範囲にあり、既往の研究⁶⁾と比較して非常に小さな値を示している。これは、今

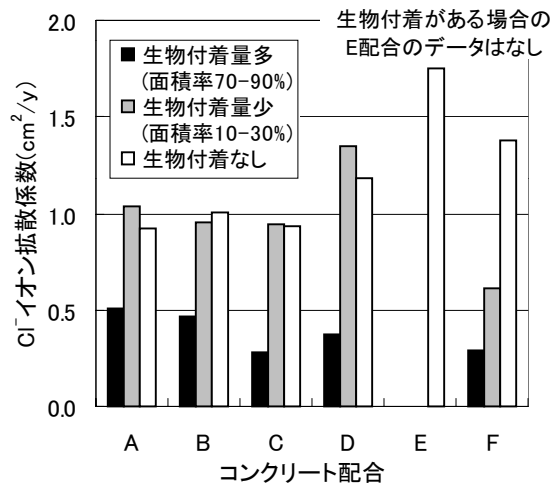


図 - 3 Cl⁻イオン拡散係数算出結果

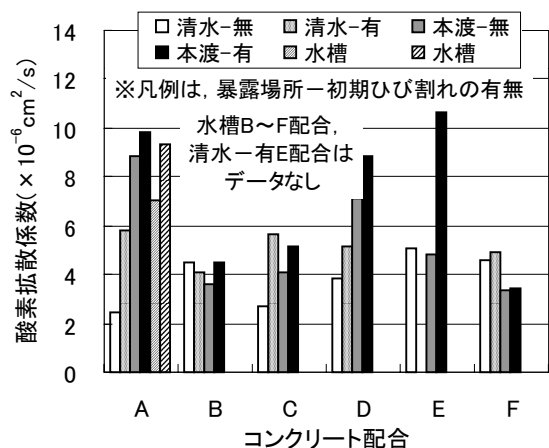


図 - 5 酸素拡散係数算出結果

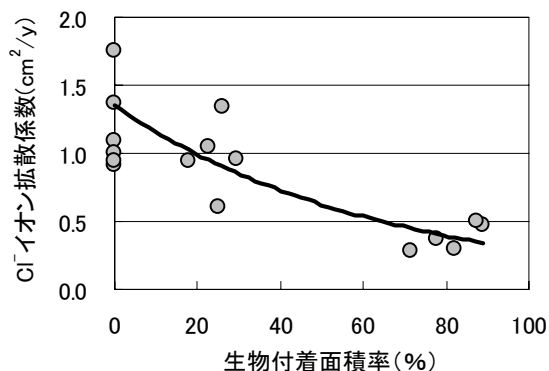


図 - 4 Cl⁻イオン拡散に及ぼす生物付着効果

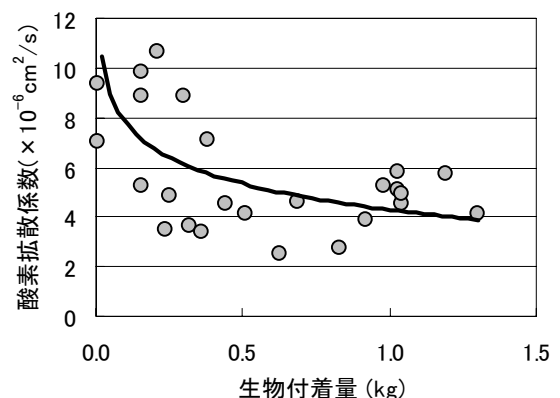


図 - 6 酸素拡散係数に及ぼす生物付着効果

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いためと考えられる。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値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-8に、鉄筋腐食速度と生物付着面積率との関係を示す。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が認められる。しかし、塩化物イオン拡散や酸素拡散ほどにはその抑制効果は顕著ではなかった。

4. 生物付着による耐久性向上効果の評価

4.1 鉄筋腐食の抑制効果

生物付着による構造物の耐久性向上効果を性能設計に導入する際に考慮する項目の一つとして、構造物中の鉄筋腐食の抑制効果を挙げる事ができる。

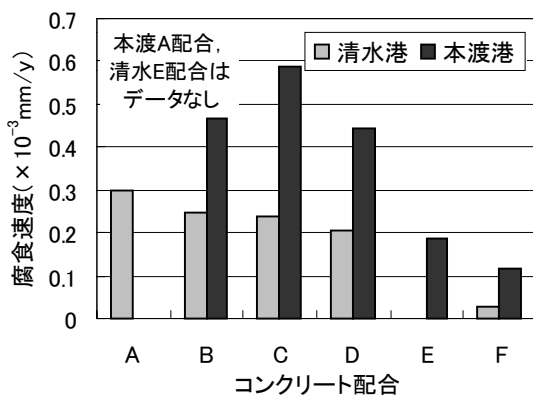


図-7 鉄筋腐食速度算出結果

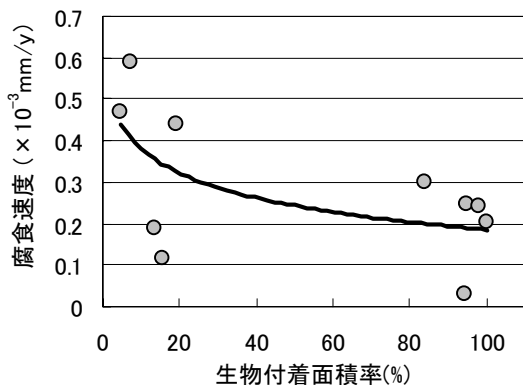


図-8 鉄筋腐食速度に及ぼす生物付着効果

図-9に、鉄筋腐食の観点からみた構造物の寿命モデルを示す。本論文では、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、潜伏期間は主に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。したがって、ここに生物付着の効果を導入すると、塩化物イオン拡散係数および酸素拡散係数を小さくすることができることから、潜伏期間および進展期間がともに長くなり、構造物の耐用年数が延長されると考えられる。

4.2 性能設計への導入

塩化物イオンの浸入とそれに伴う鉄筋腐食に関する照査⁷⁾に生物付着の効果を取り込んでパラメタスタディを行った。塩化物イオンの拡散はFickの法則に基づくものとして、腐食発生までの潜伏期間を算出した。また、その後の進展期間は、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、既往の研究⁸⁾から鉄筋断面減少率が1.5%に達するまでの期間とした。

設計条件として、コンクリートのかぶりを70mm、鉄筋径を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13.0kg/m³、

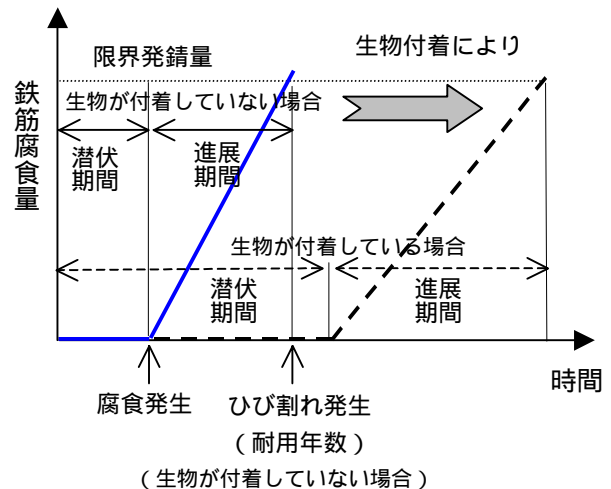


図-9 鉄筋腐食の観点からみた構造物寿命モデル

鉄筋腐食発生限界濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ とした。また、塩化物イオン拡散係数は、図 - 4 に示す本実験結果より、生物が付着しない場合、 $1.5\text{cm}^2/\text{y}$ とした。筆者らの行った栈橋コンクリート上部工（梁および床版）を対象とした調査結果⁹⁾によれば、11 地点（52 測点）における塩化物イオン拡散係数の平均値は $1.44\text{cm}^2/\text{y}$ であり、本実験結果は妥当な値を示していると考えられる。鉄筋腐食速度は、以下のように仮定した。すなわち、腐食電流密度 $1.0\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ に相当する腐食速度は $12 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{y}$ となる。これより、生物が付着がない場合を $10 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{y}$ と仮定し、それに対し、生物が付着がある場合は図 - 8 に基づき腐食速度を低減することとした。

計算結果を表 - 2 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、生物が付着し、塩化物イオン拡散係数および腐食速度がそれぞれ 1/2 に低減されたと仮定すると耐用年数は約 2 倍となる結果が得られた。

表 - 2 生物が付着が耐用年数延長に及ぼす効果

Cl ⁻ イオン 拡散係数 (cm^2/y)	潜伏期間 (y)	腐食速度 ($10^{-3}\text{mm}/\text{y}$)	進展期間 (y)	耐用年数 (y)
1.5	5.8	10	10.0	15.8
1.0	8.7	7	14.3	23.0
0.7	11.6	5	20.0	31.6
0.3	28.8	2	50.0	78.8

5. まとめ

海生生物付着による海洋コンクリート構造物の耐久性向上効果を定量的に評価することを試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 生物付着層の組織は、顕微鏡観察によるとセメントペーストよりも緻密であった。
- (2) 生物付着量が多いほど、コンクリート内部への塩化物イオン拡散および酸素拡散が小さくなり、鉄筋腐食速度も小さくなる傾向にあった。
- (3) 生物付着による構造物の耐久性向上効果を性能設計手法に取り入れ、パラメタスタディを行った結果、生物が付着することに

より、構造物の耐用年数を生物付着程度に応じて延長することができる結果を得た。

本研究の成果として、生物付着効果を設計段階から取り入れるまでには至っていない。生物付着の不確実性や不均一性、および対象構造物や適用部位の特定が明確ではないためである。今後は、さらに検討を継続していきたい。

謝辞：本研究は、運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の一環として実施したものです。本論文のとりまとめにあたっては、港湾空港技術研究所材料研究室渡邊弘子受託研究員の協力を得ました。また、海生生物の生態については、九州大学大学院理学府附属臨海実験所森敬介助手に多大なるご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内海富士夫編：原色日本海岸動物図鑑，保育社，pp.51-53，1979.12
- 2) 大即信明ほか：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,pp.97-105，1998.5
- 3) 藤嶋昭ほか：電気化学測定法(下)，技報堂出版，pp.271-277，1984.11
- 4) 岡野桂樹ほか：フジツボの着生機構，生化学，第 69 巻，第 12 号，pp.1347-1360，1997.
- 5) EBOURGET：Bamacle shells:Composition, structure and growth, Crustacean issues 5, pp.267-286, 1987.
- 6) 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），pp.88-92，2000.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編 耐久性照査型 平成 11 年版，2000.
- 8) 岩波光保ほか：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.978，2000.12
- 9) 大即信明ほか：栈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.627，1988.9