# 海生生物の付着によるコンクリート構造物の耐久性向上技術

自然がつくるコンクリート表面の緻密な保護層

## 丸屋 剛・武田 均・堀口賢一\*1・新藤竹文

Keywords: concrete, marine aquatic fouling organisms, durability, chloride penetration, corrosion コンクリート,海生生物,耐久性,塩分浸透,鉄筋腐食

## 1. はじめに

海生生物は,コンクリート表面に緻密な組織構造をも つ炭酸カルシウムを主成分とする底殻を形成することに より,鋼材の腐食因子である塩化物イオンや酸素のコン クリート中への浸透を抑制し,鋼材を保護することで構 造物の耐久性を向上させる.本報文は,コンクリート表 面を被覆する材料としての海生生物に着目し,鋼材の腐 食因子の浸入に対する抑制効果とコンクリート中の鋼材 の腐食進行抑制効果を明らかにして,コンクリート構造 物の耐久性を向上させる技術の開発を目的にして行った 研究の成果をまとめたものである.

現在,コンクリート構造物はライフサイクルコストを 算出して最適な維持管理を行っていく方向にあり,劣化 の進行予測が重要な要素の一つとなっている.したがっ て,海生生物の付着による塩化物イオンの浸透抑制効果 を考慮した劣化進行予測や耐久性照査方法の考え方を示 したことに本論文の特徴がある.現在求められている環 境保全という面で,海生生物が形成する保護層は,人工 的な有機材料や無機材料とは異なり,謂わば自然が育む 表面被覆材料であり,このような状況においては,海生 生物を友好(有効)生物として再認識するべきであると 考える.

## 2. 海生生物の付着機構と付着層の組織構造

- 2.1 海生生物の付着量に及ぼすコンクリートの材料・
  配合の影響
- 2.1.1 海洋暴露供試体の材料,配合および形状

海洋暴露試験に用いた供試体のコンクリート配合を表 -1 に,結合材の材料特性を表-2 に,骨材の物性を表-3 に示す.結合材には,普通ポルトランドセメント,高炉 スラグ微粉末,フライアッシュ II種,無水せっこう系高 強度混和材を使用した.高炉スラグ微粉末の置換率は 45%,フライアッシュの置換率は30%,高強度混和材は 外割りで15%添加した.また,混和剤はリグニン系AE 減水剤を用いた.高炉スラグ微粉末やフライアッシュを 混和材に用いるとモルタルの細孔溶液中のアルカリ度は 小さくなることから<sup>1)</sup>,アルカリ度が高い場合に付着し にくいと考えられている海生生物の付着促進を図るとい う観点にもとづきこれらの混和材を選定した.無水せっ こう系高強度混和材は組織構造の違いが生物付着を促進 する効果を期待して選定した.水結合材比は,強度の相 違および単位セメント量の違いが海生生物の付着に及ぼ す影響を明らかにするために2水準とした.

供試体の形状は 100 × 100 × 400mm とし,作製は JIS A 1132 に準拠した.鉄筋の腐食を促進させる目的で一 点集中曲げ載荷により,平均残留ひび割れ幅約 0.2mm の初期ひび割れを導入した供試体も作製した.暴露まで は水中で約3ヶ月間養生した.

## 2.1.2 供試体の暴露方法

暴露場所は,潮位変動が異なる地点として,潮位変動 の小さい静岡県清水港(干満差約 1.6m)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(干満 差約 5.5m)の2港の護岸を,そのコンクリート表面に 生物が付着していることを確認した上で選択した.

供試体の暴露は,図-1 に示すような架台に 100 × 100mm の面を底面として直立させた状態で設置することにより行い,清水港では供試体を常時海水中にある部分と干満帯にある部分に,本渡港では供試体を干満帯に暴露した.

2.1.3 海生生物の種類の同定,付着量および付着面積の 3.3.3 試験測定方法

付着生物の種類の同定は参考文献に示した図書により 行った<sup>2)</sup>.付着生物の同定後,かわすきを用いてコンク

	ᄳᄪᆉᆉ	<b>-</b> =	-14+0	灾生	/m == ++				単位量	(kg/m <sup>3</sup> )			
配合	相宜村 の最大	スラ ンプ	水 結合 材比	全瓦量	細宵 的 率	۶k	普通 ポル	高炉 マラグ	フライ	無水 せっこう	细骨材	뙤 문 材	混和
UEUU	(mm )	(cm)	(%)	(%)	(%)	71	ラント セメント	微粉末	アッシュ	系高強度 混和材		伯内切	剤
Α	20	12.0	55	4.5	44.8	170	309				824	1012	0.78
В	20	12.0	55	4.5	44.9	167	167	137			828	1012	0.76
С	20	12.0	55	4.5	45.5	159	202		87		848	1012	0.72
D	20	12.0	40	4.5	42.2	175	438				742	1012	1.53
Е	20	12.0	40	4.5	47.1	139	302			45	904	1012	
F	20	12.0	40	4.5	47.3	132	201		86	43	912	1012	

表-1 コンクリートの配合 Mixture proportion of concrete

## 表-2 結合材の物理的性質と化学組成

Physical properties and chemical composition of powders

結合材の	密度	比表面積				ſł	公学組成	(%)				
種類	(g/cm <sup>3</sup> )	(cm²/g)	Ig.loss	Insol	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$AI_2O_3$	CaO	MgO	SO3	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
普通ポルトランドセメント	3.15	3396	1.34	-	20.7	2.6	5.9	64.0	1.6	1.8	0.60	-
高炉スラグ微粉末	2.87	4270	0.6	0.1	32.8	0.8	14.3	43.0	4.4	1.9	0.16	0.25
フライアッシュ	2.20	3050	1.0	-	52.0	5.5	24.8	10.3	2.5	0.2	1.62	0.72
高強度混和材	2.51	10164	12.5	-	44.8	-	-	19.4	-	19.3	0.75	2.94



図-1 供試体の暴露方法 Exposure method of specimens



写真-1 海生生物の付着状況(清水港,A 配合,暴露 1.8 年) Marine aquatic fouling organisms(A mixture, 1.8years)

リート表面より写真-1 に示すような付着生物を除去し, その湿潤重量を生物付着量とした.付着生物除去後にコ ンクリート表面に残った写真-2 に示すような付着層 (以下,底殻とする)の面積の測定対象面積に対する比 率を付着面積率とした.なお,付着面積率の算出は, 100×100mmの2面を除いた4面とした.

2.1.4 海生生物の付着に及ぼす材料および配合の影響 観察された生物の種類は,干満帯ではフジツボ類,カ

## 表-2 骨材の材料物性

Propertis of aggregates

骨材	安地	表乾密度	絶乾密度	吸水率	実積率
種別	庄地	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
細骨材	木更津 産陸砂	2.68	2.61	2.65	64.7
粗骨材	青梅産 砕石	2.67	2.65	0.73	57.7



写真-2 海生生物の除去後にコンクリートに残った底殻 A dense layer of marine aquatic fouling organisms

キ類が最も多く,カサガイ類,イガイ類,一枚貝類,巻 き貝等であり,海中部ではゴカイ類,コケムシ類,ホヤ 等であった.底殻を形成するもののなかで,外観上で緻 密な保護層になると考えられるのはフジツボ類とカキ類 であるが,付着量や付着面積から考え,フジツボ類を本 研究の対象生物とした.

暴露1年8ヶ月における海生生物付着量および付着面 積率の測定結果を図-2および図-3にそれぞれ示す.清



図-2 海生生物の付着量(暴露1年8ヶ月) Adhesion content of organisms(1year 8months)



写真-3 フジツボ底殻の平面の SEM 映像 Superficial SEM image of a dense layer

水港と本渡港の測定結果が大きく異なっているのは,暴 露期間中に有明海で大規模に発生した赤潮の影響である と考えられる.また,付着面積率では配合の影響が顕著 には現れていない.ここでは,清水港における付着量の 測定結果で配合の影響を考察する.

図-2 において水結合材比 55%の A,B,C 配合では,結 合材として普通ポルトランドセメントのみを使用した A 配合の付着量が最も小さく,高炉スラグ微粉末やフライ アッシュを用いた B 配合や C 配合の付着量は大きい. これは,初期ひび割れなしの供試体もひび割れありの供 試体も同様の傾向である.また,水結合材比が 40%で も普通ポルトランドセメントのみを使用した D 配合の 付着量が小さい傾向にあった.これらから,高炉スラグ 微粉末やフライアッシュを混和材として使用してコンク 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.細孔溶液の アルカリ度に影響を与えるコンクリート中の水酸化カル シウムと生物付着量の関係に関する考察は次節で行う. 2.2 海生生物が形成する底殻の組織と付着機構

写真-3 にフジツボの底殻平面の SEM 写真を示す.また,写真-4 にフジツボの底殻断面の SEM 写真を示す. フジツボの底殻の厚さは 0.05mm 程度であり,セメント



図-3 海生生物の付着面積率(暴露1年8ヶ月) Adhesion area ratio of organisms(1year 8months)



写真-4 フジツボ底殻の断面の SEM 映像 SEM image of a cross section of the layer

ペースト部分よりも緻密な組織であることがわかる.この底殻は粉末X線回折法によると主に炭酸カルシウム (カルサイト)であり<sup>344</sup>,コンクリート表面に付着す る際にフジツボの幼生が付着器官の先端から分泌するタ ンパク質も数%含まれている<sup>3)</sup>.

フジツボはコンクリート表面に付着する初期段階では、 コンクリート中の Ca(OH)。の量に影響を受けやすい.図 -4 はフジツボの付着量とコンクリート中の Ca(OH), 生成 量との関係を示したものである.Ca(OH)。生成量は,別 途製作した 300×300×100mm のコンクリート供試体か ら粗骨材を取り除いたモルタルを用いて,TG-DTAの 405 から 515 の減量から求めた.これらの供試体の 配合は4章の表-4 と同一である.表-1 と表-4 の配合で 水結合材比は同じであるが骨材の種類が異なっている. 図-4 から,生物付着量が少ない付着開始の初期におい ては,コンクリート中の Ca(OH)。量が少ないほど付着し やすい傾向にあることがわかる.さらに付着が進み付着 面積率で 10~20%になると,コンクリート表層部分の 空隙量が重要な要因となる.図-5 はフジツボの付着量 と水銀圧入法により測定したモルタル部分の空隙率との 関係を示したものである.この図から,空隙が多いほど フジツボの付着量は多くなる傾向にある.







図-6 塩化物イオンの拡散係数測定用供試体 Specimen of chloride ion diffusion coefficient

以上より,フジツボの付着機構は,付着初期にはフジ ツボがコンクリート表面を好むか否かに関係するそのア ルカリ度により影響を受け,ある程度付着が進行した後 では,フジツボが体を固定するために付着器官の先端か ら放出する分泌物がコンクリート表面に固定されやすい か否かに関係する空隙量に依存する.

## 3. 海生生物が形成する底殻による鋼材腐食 因子の浸透抑制

3.1 塩化物イオンの浸透抑制効果

3.1.1 塩化物イオンの拡散係数の測定方法

2.1 に述べた初期ひび割れを導入した 100 × 100 × 400mm の供試体から,図-6 に示すように 100 × 100 × 30mm のコンクリートを切り出し,これを試験片として 電気泳動試験を行うことにより<sup>6)</sup>,フジツボが形成する 底殻を含むコンクリートにおける塩化物イオンの見かけ の拡散係数を測定した.

電気泳動試験では,アノード側のセルに Ca(OH)2 飽和 溶液を,カソード側セルには NaCl 5%溶液を満たし,カ ソード側セルに生物付着層が向くように試験片をゴム製 のアタッチメントとエポキシ樹脂により固定して,両セ



図-5 フジツボの付着量と空隙率との関係 Relation between adhesion content and air void content



図-7 塩化物イオンの拡散係数に及ぼす生物付着の影響 Effect of organisms' content on chloride diffusion coefficient

ル間に 15V の直流電圧をかけた.電極にはチタンメッシュを用いた.電気泳動によってカソード側セルからア ノード側セルに移動した塩化物イオン濃度を電位差滴定 法により測定し,式(1a)および式(1b)から塩化物イオン の見かけの拡散係数を算出した.

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

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

ここに, $D_{cl}$ :塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm2/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,  $J_{cl}$ :塩化物イオンの流束(mol/cm<sup>2</sup>/s), $C_{cl}$ :溶液濃度 (mol/cm<sup>3</sup>), $d\phi/dx$ :試験片にかかる電位勾配(V/cm),である.

3.1.2 塩化物イオンの拡散に及ぼす生物付着の影響

図-7 に塩化物イオンの見かけの拡散係数とフジツボ の付着面積率との関係を示す.付着面積率が大きくなる ほど塩化物イオンの見かけの拡散係数は小さくなる傾向



Constant electric potential test

を示しており,フジツボが形成する底殻により塩化物イ オンの浸透が抑制されていることがわかる.生物付着量 が 30%程度以下では,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.

3.2 酸素の浸透抑制効果

### 3.2.1 酸素の拡散係数の測定方法

酸素の拡散係数を算出するために図-8 に示すような 定電位ステップ試験<sup>7)</sup>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)を用いて酸素の拡散係数を算出した.

$$D_{O_2} = \delta \cdot \left( \frac{I}{n \cdot A \cdot F} \middle/ C_b \right) \tag{2}$$

ここに, $D_{O_2}$ :酸素の拡散係数(cm<sup>2</sup>/s), $\delta$ :かぶり (cm), I:限界電流(A),n:原子価,A:電極面積(cm<sup>2</sup>), F:ファラデー定数(C/mol), $C_b$ :酸素濃度(mol/cm<sup>3</sup>), である.

#### 3.2.2 酸素の拡散に及ぼす生物付着の影響

図-9 に酸素の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の 拡散を抑制する効果も有している.

## 海生生物が形成する底殻による鋼材の防 食性能

## 4.1 鉄筋の腐食促進試験方法

2.1 で述べた初期ひび割れを導入した 100 × 100







×400mm の供試体から,図-10 に示すように鉄筋が中央 に配置された状態で 100×100×100mm のコンクリート を切り出した.切り出した供試体の鉄筋端部には分極抵 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面を残して残りの5面をゴム系被覆材で被覆した. 乾湿繰返し条件は,60 の温海水に対する浸漬 3.5 日お よび室温乾燥 3.5 日とした7 日間を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.

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

ここに, *V<sub>corr</sub>*:腐食速度(cm/y), *K<sub>v</sub>*:速度定数 (cm<sup>3</sup>/y/A), *K<sub>corr</sub>*:金属の種類,環境によって定まる定 数(V), *R<sub>p</sub>*:分極抵抗(・cm<sup>2</sup>),である.

4.2 底殻による鋼材の防食性能の評価

温海水乾湿繰返し試験より求めた鉄筋腐食速度と生物 付着面積率との関係を図-11 に示す.鉄筋腐食速度は 0.05~0.6×10<sup>-3</sup> mm/年の範囲にあり,既往の研究<sup>8)</sup>と比

								•						
	ᄳᄪᆉᆉ	++ 7 =		亦乍		単位量 (kg/m³)								
配合	相宜村 の最大	スラ ンプ	水 結合 材比	定式 量	<i>細官的</i> 率	714	普通 ポル	高炉	フライ	無水 せっこう	细骨材	知丹材	混和	
1 E UU	(mm )	(cm)	(%)	(%)	(%)		ラント セメント	微粉末	アッシュ	系高強度 混和材	利可心	在市心	剤	
Α	20	12.0	55	4.5	44.0	176	320				793	986	0.80	
В	20	12.0	55	4.5	43.7	176	176	144			765	986	0.80	
С	20	12.0	55	4.5	43.1	176	224		96		748	986	0.80	
D	20	12.0	40	3.0	43.1	170	420				748	986	1.05	
Е	20	12.0	40	3.0	46.2	145	316			47	847	986		
F	20	12.0	40	3.0	45.4	145	221		95	47	821	986		

表-4 コンクリートの配合 Mixture proportion of concrete

#### 表-5 骨材の材料物性 Propertis of aggregates

			oportio or ugg	rogatoo	
骨材	安地	表乾密度	絶乾密度	吸水率	実積率
種別	生也	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
細骨材	野洲産 川砂	2.58	2.54	1.40	67.6
粗骨材	高槻産 砕石	2.71	2.69	0.88	58.8

較して非常に小さな値を示している.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,生物付着量の相違に よるものと考えられる.鉄筋腐食速度と生物付着面積率 との関係では,測定点が少なくばらつきは見られるもの 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.このことから,フジツボが形成する底 殻は,鋼材の腐食因子の浸入を抑制することにより腐食 を抑制する効果も有することが明らかとなった.

## 5. 海生生物の防食性能を考慮した劣化進行 予測と耐久性照査

5.1 底殻の面積率を考慮した塩化物イオン浸透解析 5.1.1 海洋暴露供試体と試験測定方法

塩化物イオンの浸透を調査するために用いた供試体の コンクリート配合を表-4 に示す.これは,前章までに 述べてきた表-1 の配合と使用した結合材は同一である が,骨材の種類と空気量が異なるため単位量に若干の違 いがある.骨材の材料物性を表-5 に示す.供試体の形 状は150×150×150mm とし,作製はJIS A 1132 に準拠 した.標準養生を28 日間行った後,暴露までの約2ヶ 月間散水養生を行った.暴露方法は2.1 節に述べた方法 と同じである.

暴露1年8ヶ月において, 12mm のドリルにより深 さ5mm ごとに粉末試料を採取し,同一深さ9点の粉末



試料を混合して平均化された試料を用い, JCI-SC4 に準 拠して電位差滴定法で塩化物イオン濃度を測定した. 5.1.2 生物付着表面の塩化物イオン浸透のモデル化

フジツボなどの海生生物が付着する場合のコンクリート表面における塩化物イオンの移動に関するモデルを考 案し,暴露1年8ヶ月における塩化物イオンの浸透状況 のシミュレートを行った.3.1節で明らかにしたように, フジツボの底殻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塩化物イオンの移動を一般の表面 被覆材のように一律に低減することができない.ここで は,図-12に示すようにモデル化した.

モデル考案上の仮定は以下の通りである.すなわち, フジツボが形成する底殻はコンクリート表面における塩 化物イオンの拡散係数を低減すること,コンクリート表 層における塩化物イオンの擬似吸着の効果も低減するこ と<sup>9)</sup>,生物付着部と非付着部で塩化物イオンの浸透をそ れぞれ計算し,図-12 に示すように表層の第一層におけ る塩化物イオン濃度が付着面積率に応じて加重平均され るとしたことである.

5.1.3 生物付着速度のモデル化

生物付着初期には塩化物イオンの浸透と底殻の形成が

#### 大成建設技術センター報 第 35 号(2002)



5 王初的有面積率の支配 Change of organisms' adhesion ratio

Change of organisms adhesion ratio

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底殻が形成される速度をモデル化する必要がある.ここでは,式(4)に示すようにモデル化した.

$$A_{rf} = f_{max} \cdot 0.5 \cdot [tanh\{S \cdot (T - T_{50})\} + 1]$$
(4)

ここに, A<sub>rf</sub>:生物付着面積率, f<sub>max</sub>:最終付着面積率, S:付着速度に関わる係数, T:暴露期間(年), T<sub>50</sub>:付 着面積率が 50%になる期間(年), である.

表-6 に生物付着面積率のシミュレートに用いた f<sub>max</sub>, Sおよび T<sub>50</sub>の値を暴露地点別,配合種別ごとに示し, 図-13 にシミュレート結果を示す.ここで,最終付着面 積率 は暴露1年8ヶ月の値とした.

5.1.4 塩化物イオンの浸透状況のシミュレート

5.1.2 項および 5.1.3 項で考案したモデルを用いて,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-7 に塩化物イオンの見かけの拡散係数 および生物付着による拡散係数の低減率を示す.電気泳 動法により算出した拡散係数は,図-7 に示したように 生物付着率が 100%とした場合でも生物付着がない場合 の 1/5 程度にしか小さくならない.しかし,塩化物イオ ン濃度の分布に解析値を合わせるには,生物が付着した 場合の拡散係数は付着しない場合の 1/100 程度に小さく する必要がある.なお,表-7 に示した拡散係数は濃度 分布から逆算で求めたものであり,電気泳動法の値は参 考にしていない.拡散係数の算出に関わる電気泳動



Model of chloride penetration

表-6	生物付着面積率の算出に関するパラメータ
	Developmentary of evenesisment even wette

暴露	配合	I)/I	4)におけるス	Egy					
地点	種別	$f_{max}$	$T_{50}$	S					
	А	0.95	0.65	3.5					
	В	0.97	0.75	3.5					
洼水进	С	1.00	0.70	2.6					
/月小/它	D	1.00	0.80	3.0					
	Е	1.00	0.80	3.0					
	F	0.90	0.80	3.5					
	А	0.30	1.00	4.0					
	В	0.45	1.15	3.5					
大海洪	С	0.45	1.05	3.5					
平波佗	D	0.43	0.90	4.0					
	Е	0.80	1.30	1.5					
	F	0.30	0.80	8.0					
	1								

#### <u>海生生物の付着によるコンクリート構造物の耐久性向上技術</u>

配合種別	ŀ	4	E	3	(	2	E	)	E		F	=
暴露地点	本渡	清水	本渡	清水	本渡	清水	本渡	清水	本渡	清水	本渡	清水
拡散係数 × 10 <sup>-8</sup> ,cm²/s	2.	80	1.	00	1.	10	0.	70	0.3	30	0.	40
生物付着による表面 拡散係数の低減率	0.	01	0.	01	0.	01	0.	01	0.0	01	0.	01
最終付着面積率 $f_{max}$	0.3	0.95	0.45	0.97	0.45	1.0	0.43	1.0	0.8	1.0	0.3	0.9
生物付着面積 50%に なる期間 <i>T</i> <sub>50</sub> ,年	1.0	0.65	1.15	0.75	1.05	0.7	0.9	0.8	1.3	0.8	0.8	0.8
生物付着速度係数 S	4.0	3.5	3.5	3.5	3.5	2.6	4.0	3.0	1.5	3.0	8.0	3.5

表-7 塩化物イオンの移動の解析に関するパラメータ Parameters of chloride movement



図-14 塩化物イオン濃度分布の解析結果 Analytical profiles of chloride ions concentration

法と濃度分布によるフィッティングの相互関係は今後の 課題である.

塩化物イオンの移動解析は,塩化物イオンの固定およ びセメント水和物などとの吸着も考慮し<sup>10)</sup>,細孔溶液 中の塩化物イオンの移動を拡散理論を用いて行った<sup>9)</sup>. 図-14 にシミュレート結果を示す.表-6 および表-7 から もわかるように,暴露箇所の相違は生物付着面積率のパ ラメータの相違として表すことができ,配合が同一であ れば塩化物イオンの移動に関するパラメータ,すなわち 見掛けの拡散係数などは同一とみなせる.このことから, 5.1.2 項および 5.1.3 項で考案したモデルが検証されたと 考えることができる.

5.2 コンクリート中の鋼材の腐食進行予測

### 5.2.1 腐食進行予測の考え方

コンクリート中の鋼材の腐食進行予測は,鋼材の腐食 が開始する時期,コンクリートにひび割れなどの変状が 現れる時期(使用性能に関わる時期),さらには,耐荷 力の低下をともなう時期(安全性能に関わる時期)など を予測するために必要であり,鋼材の腐食が開始された 後は鋼材の腐食速度をもとめなければならない.例えば, 図-11 の腐食速度を用い,既往の研究<sup>11)</sup>から鉄筋断面減 少率が1.5%に達するとひび割れがコンクリートに発生 すると仮定して進展期をもとめることができる<sup>12)</sup>.ま た,現状では劣化予測に用い得る鋼材の腐食速度を算定 することは困難であるとの考えから,目視による鋼材の 腐食程度をグレードで評価し,使用性能や安全性能と結 び付けることも行われる<sup>13)</sup>.本論文では,潜伏期の終 了時点である腐食が開始する時期と,進展期の終了時点 であるコンクリート表面に変状が現れる時期を予測し, 生物付着によりコンクリート中の鋼材の腐食進行がどの ように抑制されるかを評価した.

腐食開始時期は,鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食 発生限界濃度の1.2kg/m<sup>3</sup>に達した時点とし,ひび割れな どの変状が現れる時期は鋼材の腐食進行を予測してその



図-15 かぶり 65mm における塩化物イオン濃度の変化 Cl<sup>-</sup> concentaration at the 65mm cover thickness



図-17 かぶり 65mm における鋼材の腐食進行予測 Corrosion progress at the 65mm cover thickness

腐食度がIIに達した時点とした<sup>13)</sup>.腐食開始は鋼材の 腐食を許容しないというもっとも厳しい限界状態に相当 し,変状が現れるとは構造物に変状を出現させないとい う考え方に相当する限界状態である.

### 5.2.2 鋼材の腐食開始時期

A 配合について,生物付着が構造物の供用開始から 100%と 0%の場合について算出した,かぶり 65mm と 85mm における塩化物イオン濃度の経時変化を図-15 お よび図-16 にそれぞれ示す.いずれのかぶりでも,生物 付着があることにより腐食開始時期は延びる.

5.2.3 変状の出現時期

数多くの実構造物の調査結果に基づいて,腐食要因と 腐食度との関係をモデル化したニュ-ラルネットワーク モデルを適用して鋼材の腐食度を推定した<sup>14)</sup>.ニュ-ラルネットワ-クモデルの入力項目は,かぶり,中性化 深さ,鉄筋位置における塩化物イオン濃度および気温, 湿度,年降水量などの環境条件であり,各要因のデータ を与えれば,腐食グレードを出力する一つの関数として 扱うことができるものである.ここでは,中性化深さを 鋼材への酸素の供給量の指標として考えている.

かぶりは 65mm および 85mm という設定値であり, 鉄筋位置の塩化物イオン濃度は5.2.2 項で既に算出して



図-16 かぶり 85mm における塩化物イオン濃度の変化 Cl<sup>-</sup> concentaration at the 85mm cover thickness



図-18 かぶり 85mm における鋼材の腐食進行予測 Corrosion progress at the 85mm cover thickness

表-8 生物付着による耐用期間の延長

生物 付着	かぶり (mm)	潜伏期 終了時期 <sup>*</sup> (年)	進展期 終了時期 <sup>*</sup> (年)
<b>ち</b> 1)	65	10~15	25~30
ഗ്	85	20 ~ 25	50 以上
t>1.	65	5~10	10~15
<i>ч</i> 0	85	10~15	50 以上

ある.中性化深さに関してはコンクリート標準示方書 [施工編]などを参照に算出できるが,ここでは生物付着 を考慮するコンクリート表面は湿潤状態にあることから 中性化は進行しないものと仮定した.

表-6 および表-7 に示す清水港の値を用いて D 配合に ついて算出した,かぶり 65mm と 85mm における鉄筋 の腐食度の経時変化を図-17 および図-18 にそれぞれ示 す.いずれのかぶりでも,生物付着により腐食の進行は 遅くなることがわかる.

なお,5.2.2 項で算出した鋼材の腐食開始時期も含め, 潜伏期および進展期の期間について,生物付着の有無, かぶりをパラメータとして表-8 にまとめた.ここでは, 進展期の修了時期は,ニュ-ラルネットワ-クモデル鋼 材の腐食度の推定値が2.8 を超える時期とした.

## 6. 海生生物が形成する底殻の利用の実用化

6.1 現場打ちコンクリートへの適用性について

6.1.1 海上部における乾燥による塩化物イオンの移流の

### 6.1.1 抑制効果への期待

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も受けて移動し,海上部であるこ とから酸素の供給も受けることにより鉄筋が腐食する. ここで言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と定義する.これを模式的に示 したのが図-19 である.この移流の影響は,海水中のコ ンクリート表面からの塩化物イオンの浸入が抑制できれ ば低減するものであり,図-19 の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効果が期 待できる.このように海上部にある鉄筋の防食効果の他 に,海中部にある鉄筋に対する防食効果もある. 6.1.2 海中部あるいは干満帯でのひび割れ閉塞

海中部あるいは干満帯におけるコンクリート表面のひ び割れは一般に補修が困難である.これは,海水中で補 修する材料が限られること,水中における作業性および 補修費用の問題などによる.

しかし,写真-5 に示すように海生生物がひび割れを 横断して付着し,ひび割れがその底殻により閉塞される ことにより,ひび割れ部分の塩化物イオンの浸入を抑制 し,内部の鉄筋の腐食を抑制する効果が期待できる. 6.2 コンクリート埋設型枠としての適用性について

コンクリート表面にあらかじめ海生生物を付着させ, その表面を海生生物の緻密な底殻で被覆し,これを埋設 型枠として用いることにより構造物としてもその表面を 緻密な層で被覆する方法である.

海生生物は海中部及び干満帯のコンクリート表面に付 着するため,構造物としての劣化の激しい飛沫帯では付 着が期待できない.しかし海生生物の底殻が表面に形成 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, 飛沫帯における鋼材の腐食進行を抑制できる.

桟橋上部工の下面側は飛沫帯に相当し,一般に鉄筋の 腐食による劣化が顕著な部分である.この部分のコンク リート表面を緻密な層で覆うことで鉄筋の防食効果を期 待できる.

2次製品として海生生物をコンクリートに付着させる ため,現場打ちのコンクリートとは異なりその付着を制 御することが可能である.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,



図-19 生物付着による塩化物イオンの移流の抑制 Control of water movement by organisms' adhesion



写真-5 海生生物の底殻によるひび割れの閉塞状況 Blocking of a crack by a dense layer of organism

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 るように製造管理も行うことができると考える.

### 7. まとめ

(1) 海生生物の付着機構と付着層の組織構造

1) 海生生物の付着機構は, 付着初期には生物がコンク リート表面を好むか否かにかかわるそのアルカリ度に関 係し, ある程度付着が進行した後では, 生物が生成する 接着材がコンクリート表面に固定されやすいか否かに関 わる空隙量に依存する.

2)フジツボの底殻の厚さは 0.05mm 程度であり,セメ ントペースト部分よりも緻密な組織である.この底殻は 主に炭酸カルシウム(カルサイト)で構成されている.

(2) 海生生物が付着するコンクリートの性能

1)生物の付着面積率が大きくなるほど塩化物イオンの 見掛けの拡散係数は小さくなる傾向を示し,海生生物が 形成する底殻により塩化物イオンの浸透が抑制されてい る.

2)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.

(3) 生物が付着するコンクリート構造物の耐久性

鉄筋腐食速度と生物付着面積率との関係では,測定点 が少なくばらつきは見られるものの,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.

(4) 生物付着を考慮した劣化進行予測と耐久性照査

1)海生生物が形成する底殻はコンクリート表面におけ る塩化物イオンの拡散係数やコンクリート表層における 塩化物イオンの擬似吸着の効果を低減する.

2)海生生物の効果を期待することにより潜伏期間および進展期間を延長することが可能である.

(5) 海生生物が形成する底殻の利用の実用化

1)海水中の塩化物イオンが拡散以上に移流の影響も受けて移動する海面より少し上の部分で,海中部からの塩化物イオン供給を抑制することが期待できる.

2)ひび割れがその底殻により閉塞されることで,ひび 割れ部分の塩化物イオンの浸入を抑制し,ひび割れ部分 の鉄筋の腐食を抑制することが期待できる.

3)コンクリート表面にあらかじめ海生生物を付着させ, その表面を海生生物の緻密な底殻で被覆し,これを埋設 型枠として飛沫帯に用いる工法は,フジツボが付着しな い部位にも適用でき実用的である.

(6) 今後の課題

海生生物の付着を促進するための技術の開発,海生生物が形成する底殻の長期的な耐久性の確認,構造物の性 能照査のための諸性能の定量化および実構造物における 鋼材の防食効果を確認していかなければならない.

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」の助成により,東京工業大学, 独立行政法人港湾空港技術研究所および電気化学工業株 式会社と共同で実施したものです.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.また,本論文の 掲載にあたっては,東京工業大学大学院坂井悦郎助教授, 独立行政法人港湾空港技術研究所構造強度研究室長の横 田弘氏,同材料研究室長の濱田秀則氏,同研究員の山路 徹氏,岩波光保氏,同元受託研究員である渡邉弘子氏, および電気化学工業真下昌章氏のご協力と掲載の許可を いただきました.ここに感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 1) 丸屋 剛,松岡康訓:液相および固相の分析による結合材の耐久性評価に関する研究,土木学会論文集,第 478 号/ V-21, pp.41-50, 1993.
- 2) 内海冨士夫編:原色日本海岸動物図鑑,保育社, pp.51-53, 1979.12.
- 3) 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, pp.1347-1360, 1997.
- 4) E.BOURGET : Barnacle shells:Composition, structure and growth, Crustacean issues 5, pp.267-286, 1987.
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002 年制定, 2002.3.
- 6)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,pp.97-105,1998.5.
- 7)藤嶋昭:電気化学測定法(下),技報堂出版,pp.271-277, 1984.11.
- 8) 土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会: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.
- 9) 丸屋 剛, TANGTERMSIRIKUL Somnuk, 松岡康訓: コン クリ - 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, V-38, No.585, pp.79-95, 1998.
- 10) 坂井悦郎・吉田夏樹・真下昌章・渡邊弘子:各種セメントを用いたコンクリートの生物付着性状と塩化物イオンの固定,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.681-686, 2002.6.
- 11) 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, 2000.12.
- 12) 濱田秀則・岩波光保・丸屋 剛・横田 弘:海生生物付 着による海洋構造物の耐久性向上について,コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp. 675-680, 2002.6.
- 13) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編],2001 年制定,2001.3.
- 14) 武田 均, 丸屋 剛: ニューラルネットワークを用いたコ ンクリート構造物中の鉄筋の腐食進行予測, コンクリート 工学論文集, Vol.9, No.1, pp.133-142, 1998.1.