

海生生物が形成する緻密な保護層による 鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上

丸屋 剛¹・岩波光保²・坂井悦郎³・真下昌章⁴・濱田秀則²

¹正会員 工博 大成建設株式会社 土木技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail : tsuyoshi.maruya@sakura.taisei.co.jp

²正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 東京工業大学大学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴テクノコンサルタント株式会社 (〒100-8455 東京都千代田区有楽町1-4-1)

海生生物であるフジツボは、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ことを明らかにした。また、コンクリートの配合や材料を変化させることにより、アルカリ度が小さいほど、表面が多孔であるほど底殻の形成量が増加することを実験的に明らかにした。さらに、底殻の成長と鋼材腐食因子のコンクリートへの浸入抑制効果を考慮した塩化物イオンの移動および鋼材の腐食進行予測にもとづく耐久性照査の考え方を示し、海生生物が形成する底殻を鉄筋コンクリート構造物の高耐久化に応用するための考え方についても検討を加えた。

Key Words : *marine concrete, marine aquatic fouling organisms, membrane layer of barnacles, durability, prediction of deterioration*

1. はじめに

コンクリート構造物と海生生物の付着の関係を考える場合、一般には海生生物をいかに付着させないかの技術を開発することに重点がおかれる。例えば、海水を利用する工場の取放水路などでは、海生生物が水路内面のコンクリート表面に付着すると、その粗度係数が増加し流量に支障をきたしたり、海生生物の死骸による機械設備への悪影響など構造物としての機能低下が見られることになる。また、海生生物の除去作業にともなう維持管理費用の増加も無視しえない。海生生物が汚損生物と言われる所以であり、海生生物の忌避物質の開発も盛んである。

一方で、海生生物はコンクリート表面を覆うことから、コンクリート中への塩化物イオンなどの浸入を抑制する効果があることが経験的、定性的にはわかっていた。例えば、塩化物イオンの浸透に及ぼす配合の影響を明らかにするために海中に供試体を暴露する場合、コンクリート表面にフジツボなどの海生生物が付着していると、海水と接するコンクリート面の状態が付着していない場合と比較して塩化物

イオンが浸入しにくくなり、その場合には拡散係数を適切に評価できないと考えられる。ここでも、海生生物の塩化物イオンの浸透抑制効果を議論するのではなく、付着の悪影響が問題となるだけである。

本論文は、コンクリート表面を被覆する材料としての海生生物であるフジツボに着目し、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う方向にあり、維持管理では劣化の進行予測が重要な要素の一つとなっている。本論文では、海生生物の付着による塩化物イオンの浸透抑制効果も考慮に入れた劣化進行予測や耐久性照査方法の考え方も示した。また、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って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られる。

表-1 コンクリートの配合

配合 種別	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	水結合 材比 (%)	空気 量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水	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	無水 せ っ こ う 系 高 強 度 混 和 材	細骨材	粗骨材	混和 剤
A	20	12.0	55	4.5	44.8	170	309	—	—	—	824	1012	0.78
B	20	12.0	55	4.5	44.9	167	167	137	—	—	828	1012	0.76
C	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
E	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-2 結合材の物理的性質と化学組成

結合材の 種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学組成 (%)									
			Ig. loss	Insol	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ 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

2. 海生生物の付着機構と付着層の組織構造

コンクリートの配合が海生生物であるフジツボの付着に及ぼす影響を、2個所の海洋環境に暴露した供試体における海生生物の付着状況により明らかにした。また、付着層の組織構造を成分分析により特定した。

(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

a) 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、混和剤にはリグニン系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¹⁾、アルカリ度が高い場合には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基づき、これらの混和材を選定した。また、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。水結合材比については、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。

表-3 骨材の材料物性

骨材 種別	産地	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)
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

供試体の形状は100×100×400mmとし、その作製は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。

b) 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、清水港では供試体が常時海中にある部分と干満帯にある部分に、本渡港では干満帯にある部分に架台を取り付けた。

c) 海生生物の同定、付着量および付着面積の試験測定方法

付着生物の種類と同定は参考文献に示した図書により行った²⁾。付着生物の同定後、かわすきを用いてコンク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

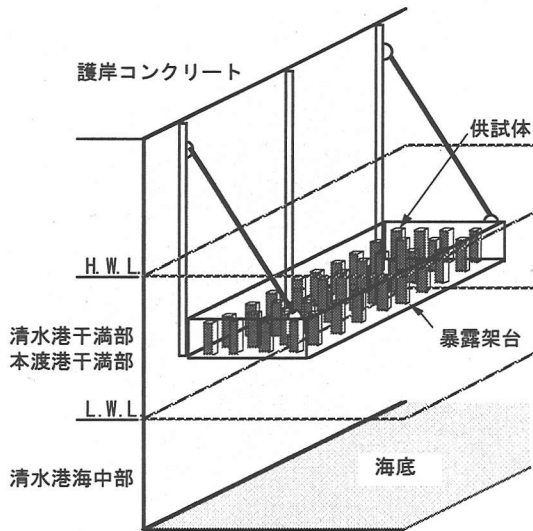


図-1 供試体の暴露方法

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。

d) 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、海中部分ではゴカイ類、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、図-3 に示した付着面積率は耐久性評価における指標であるが、配合の影響が顕著には現れていない。ここでは、このこと、付着量と付着面積率はある程度の正の相関関係があること、および付着面積率は収束しやすく種々の要因との相関がとりづらいことから、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こととした。

図-2 において水結合材比が55%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

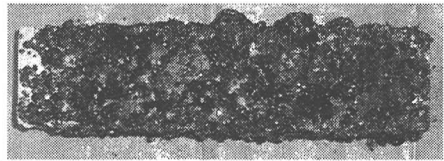


写真-1 海生生物の付着状況(清水港,A配合,暴露1.8年)

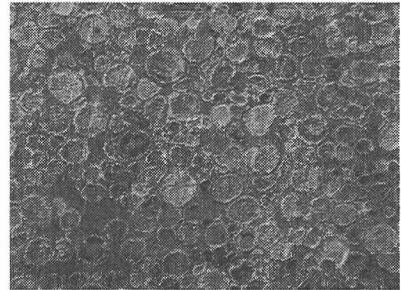


写真-2 海生生物の除去後にコンクリートに残った底殻

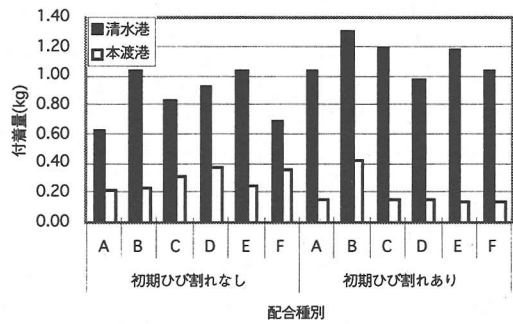


図-2 海生生物の付着量(暴露1年8ヶ月)

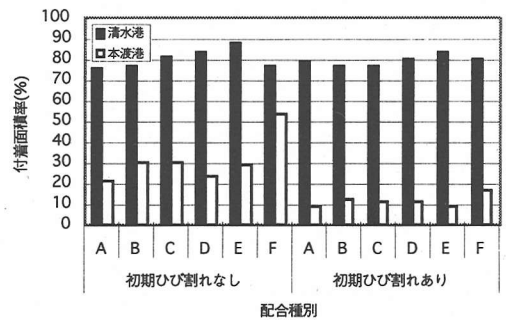


図-3 海生生物の付着面積率(暴露1年8ヶ月)

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関係す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。

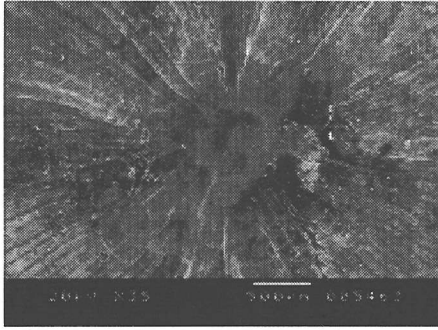


写真-3 フジツボ底殻の平面のSEM映像

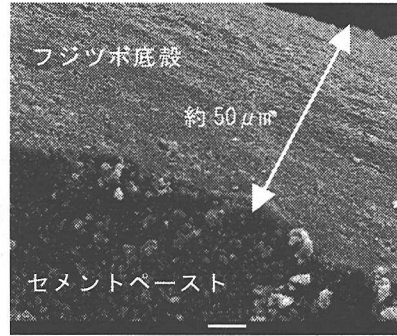


写真-4 フジツボ底殻の断面のSEM映像

(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^{3),4)}、既往の研究によれば、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³⁾。

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)₂の量に影響を受けやすいと推測される。図-4は、フジツボの付着量とコンクリート中のCa(OH)₂生成量との関係を示したものである。Ca(OH)₂生成量は、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表-1の配合ではなく4章の表-4と同一である。表-1と表-4の配合は、骨材の種類が異なることから各材料の単位量も相違しているが、使用した結合材は同一ロットのものであり、水結合材比も同じで各材料の単位量の相違も大きくないことから、表-1と表-4の配合は本実験に関しては同一であると考えてよいと判断した。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)₂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、生物付着量が多い場合には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。

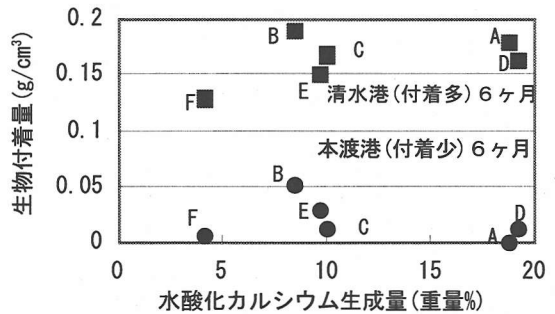


図-4 フジツボの付着量とCa(OH)₂生成量との関係

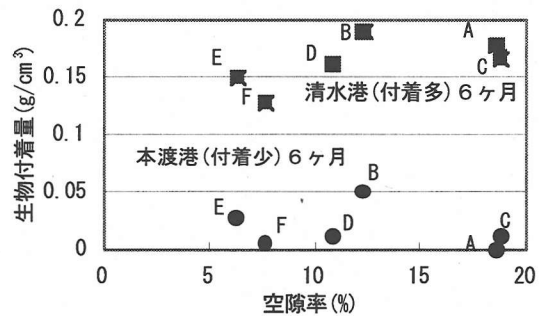


図-5 フジツボの付着量と空隙率との関係

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があ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がある空隙量に依存するものと考えられる。

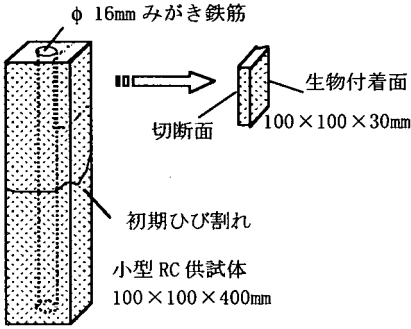


図-6 塩化物イオンの拡散係数測定用供試体

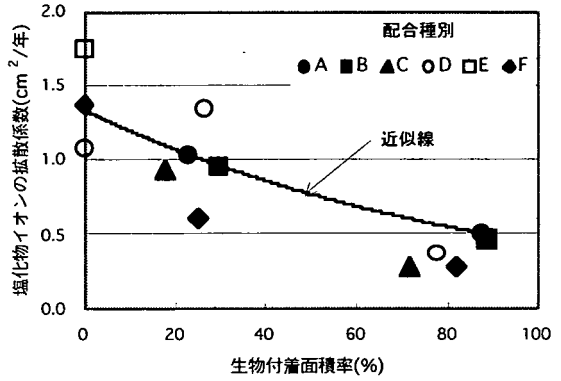


図-7 塩化物イオンの拡散係数に及ぼす生物付着の影響

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

2章(3)節で述べたように、フジツボは緻密な底殻をコンクリート表面に形成する。この底殻が、コンクリート中の鋼材の腐食因子である塩化物イオンや酸素の浸透を抑制することを、コンクリートの性能の観点³⁾から実験的に明らかにした。

(1) 塩化物イオンの浸透抑制効果

a) 塩化物イオンの拡散係数の測定方法

2章(1)節に述べた表-1 に示す配合で、清水港に1年8ヶ月間暴露し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⁶⁾、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掛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掛けの拡散係数を算出した。

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

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

ここに、 D_{cl} ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数

(cm²/s)、 u_{cl} ：電気的移動度(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、 J_{cl} ：塩化物イオンの流れ(mol/cm²/s)、 C_{cl} ：溶液濃度(mol/cm³)、 $d\phi/dx$ ：試験片にかかる電位勾配(V/cm)、である。

b) 塩化物イオンの拡散に及ぼす生物付着の影響

図-7に、塩化物イオンの見掛けの拡散係数とフジツボの付着面積率との関係を示す。付着面積率が大きい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。生物付着面積率が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小さいが、生物付着面積率が70%以上になると低減効果は顕著に現れる。

(2) 酸素の浸透抑制効果

a) 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⁷⁾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。この電位は、-1200mVまで電位を下げると水素が発生し、-800mVでは計測データに有意な差がでないことから決定したものである。

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。

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

ここに、 D_{O_2} ：酸素の拡散係数(cm²/s)、 δ ：かぶり(cm)、 I ：限界電流(A)、 n ：原子価、 A ：電極面積

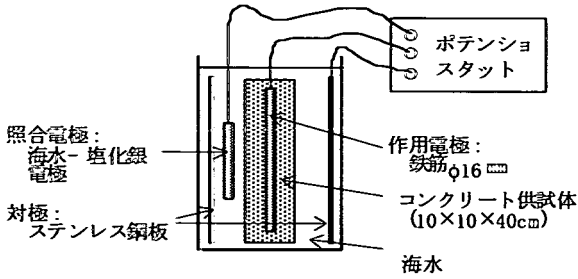


図-8 定電位ステップ試験の概要

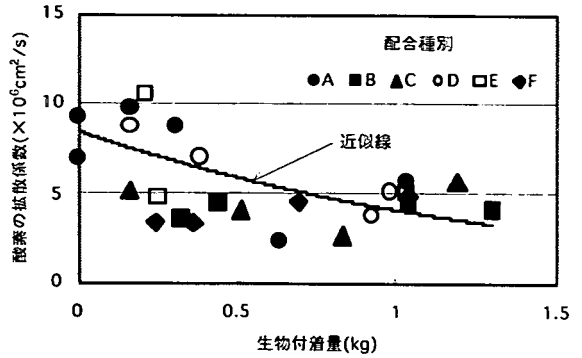


図-9 酸素の拡散係数に及ぼす生物付着の影響

(cm^2), F : ファラデー定数 (C/mol), C_b : 酸素濃度 (mol/cm^3), である。

b) 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。配合ごとにみると、生物付着量の増加にともない酸素の拡散係数が減少する傾向にあることがわかる。また、全体的にみても、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。

4. 海生生物が形成する底殻による鋼材の防食性能

3章で述べたように、フジツボが形成する底殻は鋼材の腐食因子の浸透を抑制する。本章では、コンクリート構造物の耐久性の観点から⁵⁾、底殻がコンクリート中の鋼材の腐食を抑制する効果に関して暴露供試体を用いて実験的に明らかにした。

(1) 鉄筋の腐食促進試験方法

2章(1)節で述べた表-1 に示す配合で、清水港に1年8ヶ月間暴露した初期ひび割れ導入の $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 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 $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ 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°C 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。

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

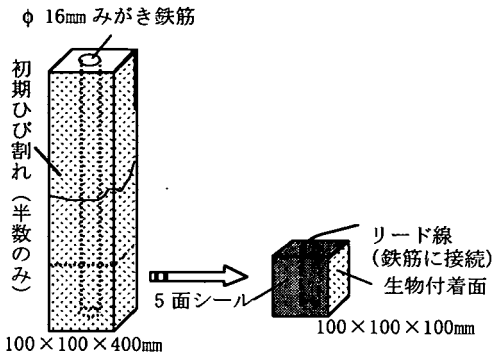


図-10 鉄筋の腐食促進試験用供試体

ここに、 V_{corr} : 腐食速度 (cm/y), K_v : 速度定数 [$=1160$] ($\text{cm}^3/\text{y}/\text{A}$), K_{corr} : 金属の種類、環境によって定まる定数 [$=0.026$] (V), R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$), である。

(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 $0.05 \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ の範囲にあり、既往の研究⁹⁾と比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。

表-4 コンクリートの配合

配合種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水	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	無水せっこう系高強度混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
A	20	12.0	55	4.5	44.0	176	320	—	—	—	793	986	0.80
B	20	12.0	55	4.5	43.7	176	176	144	—	—	765	986	0.80
C	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
E	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-5 骨材の材料物性

骨材種別	産地	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)
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

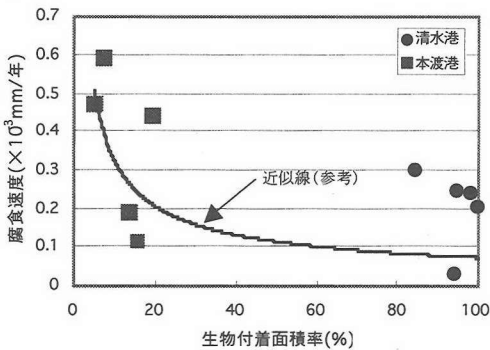


図-11 鋼材の腐食速度に及ぼす生物付着の影響

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

本章では、コンクリート構造物の耐久性の照査⁵⁾に必要な塩化物イオンの浸透と鋼材の腐食進行の予測を行い、鋼材の腐食発生限界である潜伏期の終了時期、コンクリート表面にひび割れが発生する限界である進展期の終了時期を算出することにより、耐久性照査の考え方を示した。

(1) 底殻の面積率を考慮した塩化物イオン浸透解析 a) 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章(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、φ12mm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

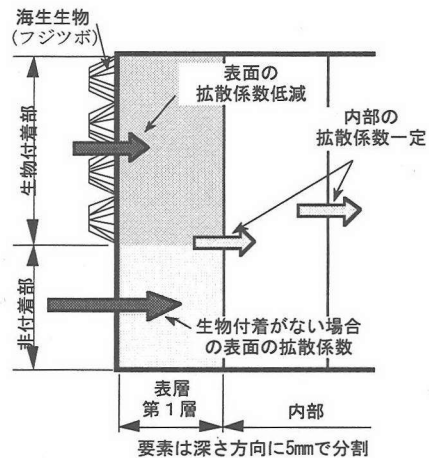


図-12 生物付着を考慮した塩化物イオンの浸透モデル

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。

b) 生物付着表面の塩化物イオン浸透のモデル化

海生生物であるフジツボが付着する場合の、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ヶ月時点での塩化物イオンの浸透状況のシミュレートを行った。3章(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。したがって、ここでは図-12に示すようにモデル化した。

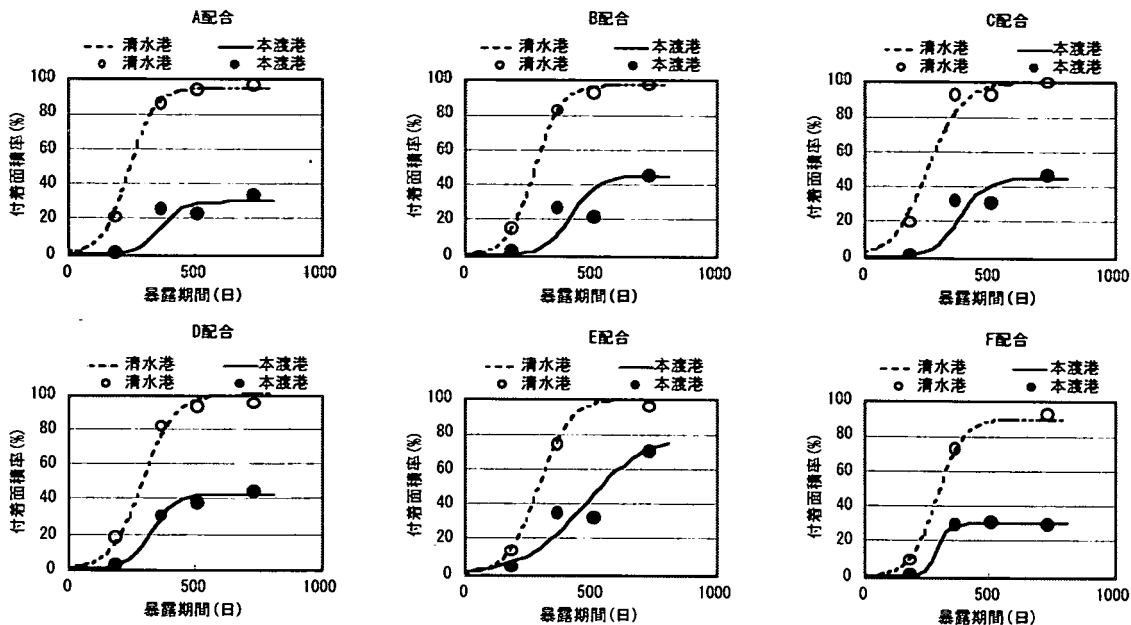


図-13 生物付着面積率の変化

モデル考案上の仮定は以下の通りである。すなわち、①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、②コンクリート表層における塩化物イオンの擬吸着の効果も低減すること⁹⁾、③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ことである。

c) 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。

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

ここに、 A_{fj} ：生物付着面積率、 f_{max} ：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_{50} ：付着面積率が最終付着面積率の50%となる期間(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_{max} 、 S および T_{50} 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 f_{max} は暴露1年8ヶ月の値とした。

d) 塩化物イオンの浸透状況のシミュレート

本節 b) 項および c) 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浸透のシミュレ

表-6 生物付着面積率の算出に関するパラメータ

暴露地点	配合種別	式(4)における定数		
		f_{max}	T_{50}	S
清水港	A	0.95	0.65	3.5
	B	0.97	0.75	3.5
	C	1.00	0.70	2.6
	D	1.00	0.80	3.0
	E	1.00	0.80	3.0
	F	0.90	0.80	3.5
本渡港	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	0.80	1.30	1.5
	F	0.30	0.80	8.0

トを行った。表-7 に、塩化物イオンの見掛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コンクリート表面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。ここでは、この低減率を一律仮定して計算を行った。この低減率はあくまで仮定値としての低減率であり、配合や使用する材料の種類によっては変化すると考えられるものである。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、図-12 に示す内部の拡散係数

表-7 塩化物イオンの移動の解析に関するパラメータ

配合種別	A		B		C		D		E		F	
	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, $\text{cm}^2/\text{年}$	0.88		0.32		0.35		0.22		0.095		0.13	
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		0.01		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 T_{50} , 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

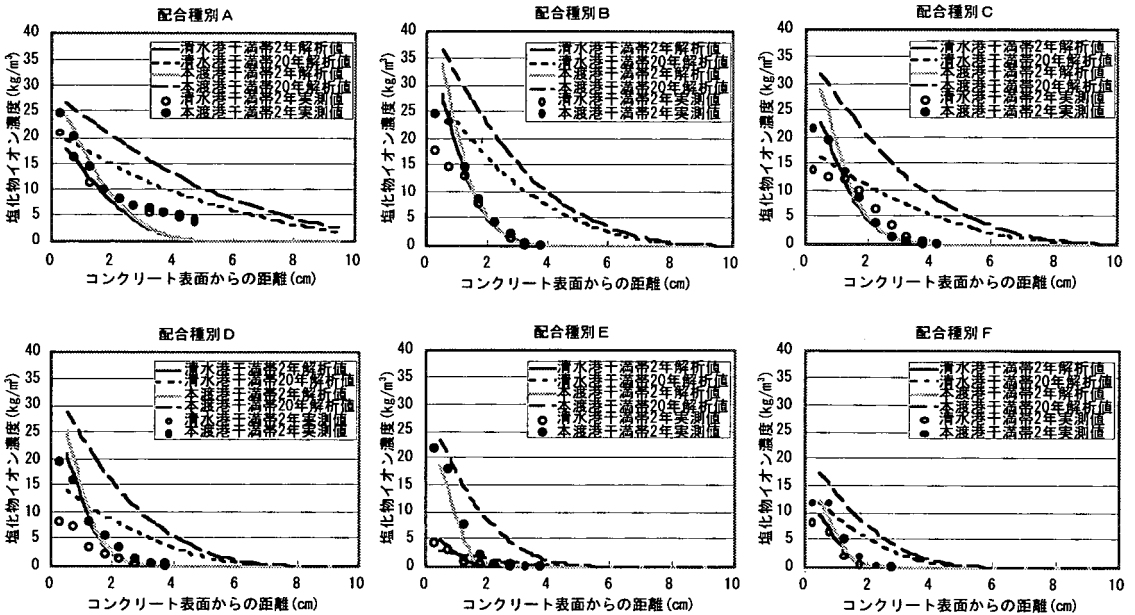


図-14 塩化物イオン濃度分布の解析結果

に相当し、電気泳動法の値は参考にしていない。これら拡散係数の算出に関わる電気泳動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の吸着も考慮し¹⁰⁾、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⁹⁾。図-14 にシミュレート結果を示す。表-6 および表-7 からわかるように、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、本節 b) 項および c) 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。

(2) コンクリート中の鋼材の腐食進行予測

a) 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、耐荷力の低下をとまなう時期（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、コンクリートにひび割れが発生する鉄筋断面減少率を仮定して進展期をもとめることができる¹¹⁾¹²⁾。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¹³⁾。

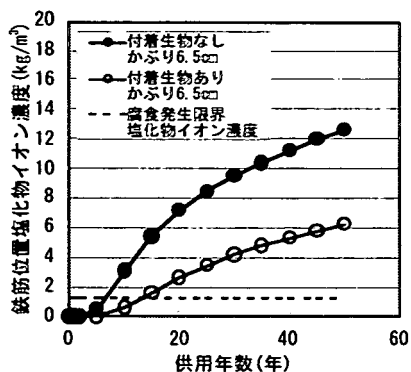


図-15 かぶり 65mmにおける塩化物イオン濃度の変化の解析結果

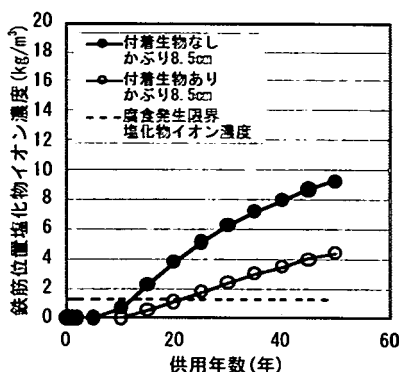


図-16 かぶり 85mmにおける塩化物イオン濃度の変化の解析結果

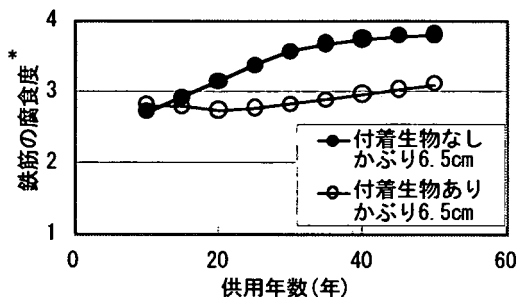


図-17 かぶり 65mmにおける鋼材の腐食進行予測

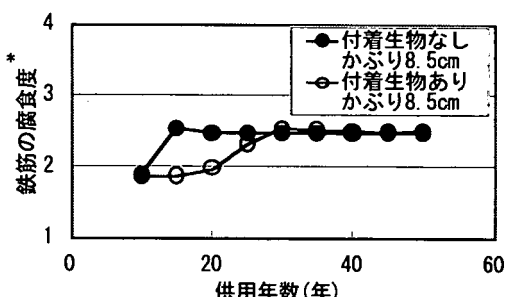


図-18 かぶり 85mmにおける鋼材の腐食進行予測

*鉄筋の腐食度とは、参考文献 14) のニューラルネットワークモデルにより計算される値で、大きい値ほど腐食が激しいことを表す。

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^3 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腐食度がⅢに達した時点とした¹³⁾。前者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、後者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。

b) 鋼材の腐食開始時期

生物付着が構造物の供用開始からあり、その面積率が 100%と 0%の場合の A 配合について、かぶり 65mm と 85mm における塩化物イオン濃度の経時変化を算出した。その結果を図-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ことがわかる。

c) 変状の出現時期

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ー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¹⁴⁾。ニューラルネットワー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、鉄筋位置における塩化物イオン濃度は本節 b) 項ですでに算出してある。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、かぶり 65mm と 85mm における鉄筋の腐食度の経時変化を算出した。その結果を図-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、本節 b) 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、進展期の終了時期は、ニューラルネットワークモデル鋼材の腐食度の推定値が 2.8 を超える時期(腐食グレードのⅢに相当)と仮定した。

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* (年)	進展期 終了時期* (年)
あり	65	10~15	25~30
	85	20~25	50以上
なし	65	5~10	10~15
	85	10~15	50以上

* 供用開始からの年数

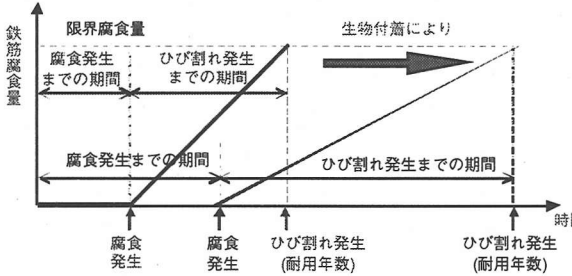


図-19 耐久性設計に関する考え方

(3) 海生生物の効果を期待した耐久性照査

本章(2)節で明らかにしたように、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。このことに基づき、海生生物の付着効果を期待した場合の耐久性照査の考え方を図-19に示した。耐久性照査を行う限界状態は、潜伏期の終了時点と進展期の終了時点である。

6. 海生生物が形成する底殻の利用の実用化

本章では、組織構造の緻密な底殻を積極的に利用するための考え方を示す。海水中で底殻が形成されるのは自然現象であり、また、海水中では腐食進行が遅いことから、腐食の激しい飛沫帯で底殻の防食性能を利用するための考え方も示す。

(1) 現場打ちコンクリートへの適用

現場打ちコンクリートの表面に海生生物を付着させて塩化物イオンの浸透を低減し、構造物中の鉄筋の腐食進行を抑制する方法を述べる。ここで対象とする構造物は、栈橋の下部工、ケーソン、護岸、橋脚、コンクリート製浮体などである。

海生生物のうち、海中でも比較的海面に近いコンクリート表面に付着する海生生物の塩化物イオン浸透抑制効果を積極的に利用するため、以下に示すような考え方により適用方法を検討した。現段階では、海生生物の付着の不確実性や不均一性の問題も残されており、一般的な耐久性向上対策の効果にさらにフェールセーフとしての効果を期待するものである。

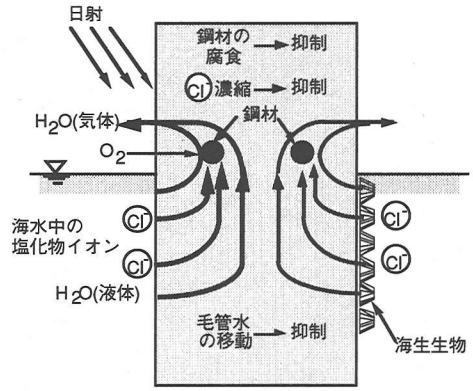


図-20 生物付着による塩化物イオンの移流の抑制

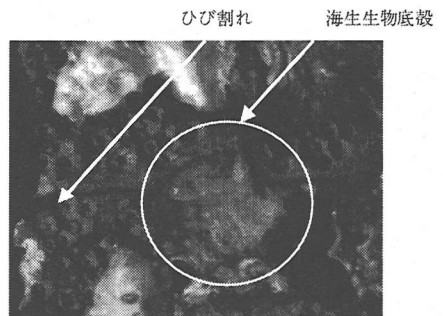


写真-5 海生生物の底殻によるひび割れの閉塞状況

a) 干満帯における乾燥による塩化物イオンの移流の抑制

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、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した。これを模式的に示したのが図-20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-20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。このように干満帯にある鉄筋の防食効果の他に、海中中部にある鉄筋に対する防食効果もある。

b) 海中中部あるいは干満帯でのひび割れ閉塞

海中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。

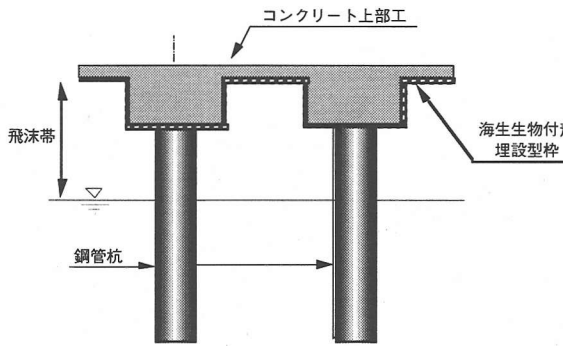


図-21 栈橋上部工における埋設型枠としての適用例

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。

(2) 2次製品コンクリートへの適用

コンクリートの2次製品としての適用では、あらかじめ製作したコンクリート製品を実環境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。ここで対象とする2次製品は、コンクリート埋設型枠とU字溝などのその他の2次製品である。

コンクリートを海水に浸漬するため、海生生物をコンクリート表面に付着させると同時に塩化物イオンもコンクリート中に浸透する。一般に塩化物イオンをあらかじめ含むものは使用されにくいですが、その濃度が種々の基準値より小さい場合や劣化予測を行って耐久性を照査できれば使用できることとなる。

a) コンクリート埋設型枠

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。

図-21 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。図に示すように、上部工下面側は飛沫帯に相当し、一般に鉄筋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、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ができると考える。

b) その他の2次製品

U字溝、柵あるいはヒューム管などのコンクリート表面に海生生物の底殻を形成し、2次製品の耐久性を向上させることも可能であると考えられる。これらの2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る場合に海生生物の底殻による防食性能を期待できる。

7. 結論

本研究では、コンクリート中の鋼材を保護する材料としての海生生物に着目し、海生生物であるフジツボの付着、鋼材の腐食因子の浸入に対する抑制効果、および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た。その結果、コンクリート構造物の劣化進行予測と耐久性照査の考え方、さらには、耐久性を向上させる技術の開発に関して以下の結論が得られた。

(1) 海生生物の付着機構と付着層の組織構造

- 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関係があ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係がある空隙量に依存する。

- 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

- 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。

- 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

- 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を低減する。

・ 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

・ 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できる。

・ 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効果が期待できる。

・ 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ことにより、構造物の表面を緻密な層で被覆し、鋼材の腐食進行を抑制できる。

(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、本論文のとりまとめにあたっては、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および同材料研究室の山路徹氏、元受託研究員である渡邊弘子氏の協力を得ました。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) 内海富士夫編：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) Bourget, E. : 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, 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.

(2002. 7. 2 受付)

DURABILITY ENHANCEMENT OF RC STRUCTURES
COVERED WITH A DENSE LAYER
FORMED BY MARINE AQUATIC FOULING ORGANISMS

Tsuyoshi MARUYA, Mitsuyasu IWANAMI, Etsuo SAKAI, Masaaki MASHIMO
and Hidenori HAMADA

Marine aquatic fouling organisms form a dense layer on the surface of concrete structures and enhance durability against corrosion of reinforcement bars. The reason is that a surface layer formed by these organisms restrains penetration of chloride ions and oxygen into concrete and controls corrosion of reinforcement steel. The less OH^- concentration of pore solution is and the more the volume of pore is, the more the layer is. The concept of durability assessment based on prediction of chloride ions penetration and corrosion progress and the method of utilization of this layer for durability improvement are also shown in this paper.