

論文 海洋環境下に長期間暴露した各種被覆材料を施した鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果

星野富夫*¹ 魚本健人*² 小林一輔*³

要旨: 海水飛沫を常時受ける海洋環境下で、長期間の耐久性が期待される防食方法として、合成高分子材料のコーティングやポリマーセメントモルタルのライニング等がある。

本報告は、これらの防食処理を施した鉄筋コンクリート梁の長期間の海洋暴露実験を行い、それらの耐久性や塩化物の遮蔽等の防食効果を検討したものである。防食方法によって、表面劣化の進行や塩化物の浸透は各々異なるものの、いずれの防食方法であっても、その材料自身が欠損したり破断した場合には、コンクリートに塩化物が浸透し鋼材腐食を誘引する。長期の耐久性を期待する場合には用途の選定や改善が必要である。

キーワード: 海洋暴露、防食方法、コンクリート、塩化物浸透、鋼材腐食

1. はじめに

海洋飛沫帯のような極めて厳しい腐食環境下に設置される構造物には、何らかの積極的な防食の適用が必要であり、環境や施工等の条件を考慮した防食方法については、JCI-R1「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」[1]にもあげられている。また、補修工法についても積極的な実験・検討[2]がなされているが、いずれの場合にも長期間の防食効果についての報告は少ない。

本論文は、前述の積極的な防食方法として、JCI-R1「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」で、第2種防食法の一つとして取り上げている「コンクリート層で腐食性成分の侵入を防ぐ方法」である合成高分子材料のコーティング(以下、ECと称する)、GRC型枠を適用したコンクリート(以下、GRCと称す)、ポリマーセメントモルタルのライニング(以下、PCMと称す)を施した鉄筋コンクリート梁について、海洋飛沫帯における長期間(10、12年)の海洋暴露実験を行い、それらの耐久性や塩化物の浸透等の防食効果を明らかにしたものである。なお、これらのコンクリート梁の海洋暴露5年までの結果と考察については、既に報告[3]している。

2. 実験概要

2. 1 各種防食方法

(1)合成高分子材料のコーティング(EC)

合成ゴム系のポリブタジエンをイソシアネートプレポリマーで架橋硬化させた弾性ポリブタジエン防水材をコーティングしたものであり、下地処理としてエポキシ樹脂系プライマーを使用し、上塗り材としては耐候性の改善を図るためにアクリルウレタン樹脂系の塗料を塗布した。このコーティングは、コンクリートの打設面以外の5面に施したものであり、コーティング厚さは0.6~1.0mmであった。

*1 東京大学技術官 生産技術研究所、(正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所、工博、(正会員)

*3 千葉工業大学教授 千葉工業大学土木工学科、工博、(正会員)

(2) GRC型枠を適用したコンクリート (GRC)

早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比:30%、C:S=3:2のモルタルと長さ37mmに切断した耐アルカリガラス繊維を型枠に混合吹きつけたものであって、板厚が10mmとなるように成形したガラス繊維補強板を永久型枠としたものである。ガラス繊維は容積で3%および5%混入した。尚、成形した板厚は、8.5~12mmの範囲であって、平均でほぼ10mmである。コンクリートはこのGRC型枠内に打設したものであって、打設面は開放状態とした。

(3) ポリマーセメントモルタルのライニング (PCM)

ポリマーセメントモルタルは、アクリル樹脂エマルジョン (固形分45%) と珪酸質骨材・顔料にセメントを混合したものである。少量添加剤としては、分散剤、消泡剤、増粘剤、特殊繊維 (ビニロン繊維:0.5%・Wt) 等が入っている。塗布は2種類のポリマーセメント比が異なるものを用いて3層に行い、ポリマーセメント比が25%のものは下塗りとし、ポリマーセメント比が17%のものは中塗りに用いた。これらのライニングは、コンクリートの打設面以外の5面に行い、ライニングの厚さは8~11mm程度であった。

2. 2 コンクリートの使用材料と配合

セメントは普通ポルトランドセメント (比重:3.15、比表面積:3,320cm²/g)、細骨材は大井川産の川砂 (比重:2.64、吸水率:0.15%、F.M.:3.17)、粗骨材は最大寸法15mmの碎石 (比重:2.70、吸水率:0.47%、F.M.:6.40) を用いた。コンクリートは、スランプが8±1cm、水セメント比:60%、S/a:47%のものを用いた。

2. 3 供試体

実験に用いた鉄筋コンクリート梁は、10×10×120cmの矩形梁であり、その内部にはD10の異形鉄筋 (高炉品:長さ=110cm) を2本埋め込んだ。ECのコンクリート梁の鉄筋のかぶり厚は2cmとし、GRCのコンクリート梁の鉄筋のかぶり厚は、型枠の厚さを含めて2cmとした。また、PCMのコンクリート梁の鉄筋のかぶり厚は2cmである。

これら鉄筋コンクリート梁のコーティングとライニングは、コンクリート打設後4~6週間の湿潤養生を行った後に施した。尚、これら材料・供試体の概要は表-1に示す。

ECとGRCの鉄筋コンクリート梁の供試体は、防食を施している鉄筋のかぶり側を上面として、図-1に示すように同一条件の2本の梁を1組として締めつけて海洋暴露に供した。この締めつけは、予め無処理のコンクリート梁について、図-1に示すような載荷試験を行い、スパン中央部の曲げひびわれ幅が0.2~0.3mmとなる荷重を調べて、この荷重で

表-1 防食材料・供試体の概要

種類	表示	かぶり (cm)	ガラス繊維 V _f (%)	平均厚み (mm)	単位セメント量 (kg/m ³)	暴露期間 (年)
E C	EC-2	2	-	0.6	-	1.2
	EC-3	3				
G R C	GRC-3%	2	3	1.0	1.105	1.2
	GRC-5%		5			
P C M	PCM	2 (3cm)	特殊繊維	1.0	800~620	1.0

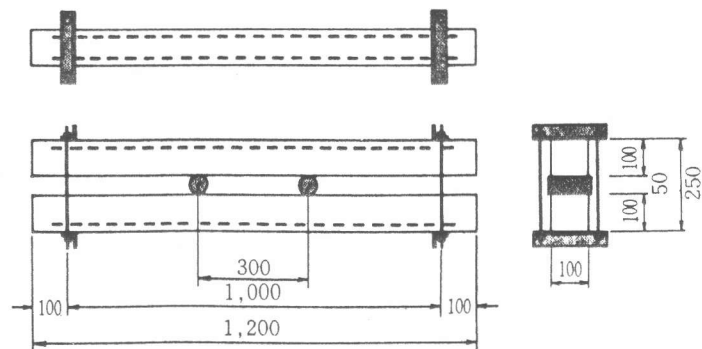


図-1 試験体の寸法と締めつけ方法 (単位:mm)

締めつけたものである。尚、PCMの鉄筋コンクリート梁は、ひびわれの影響を排除したものについて調べることを目的として、単に両端を固定した状態で暴露に供した。

2. 4 暴露試験

暴露試験は、静岡県伊豆半島東海岸の岩場に設置した海洋暴露試験場において実施した。供試体は、最高潮位から約50cmの位置の架台に固定したものであり、防食処理を施したかぶり側が上側になるようにし、梁の長手方向が打ち寄せる波の進行方向と平行になるように固定した。

この場所は、満潮時には波で洗われ、干潮時にも常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下である。この暴露場所の気温・風雨等の気象条件の詳細は、既往の論文 [4] において詳細に報告している。尚、暴露期間は、ECとGRCのものは12年、PCMは10年である。

3. 実験結果と考察

(1)ひびわれなどの劣化状態の観察

暴露期間が12年時点でのコンクリート梁の外観は写真-1に示すように、表面の防食材料の破断や欠落等が認められない場合には、劣化の兆候は認められなかった。この写真に示すGRC-5%の供試体も、外観からは劣化の兆候は認められなかったが、取り出した鉄筋には、5%程度の腐食領域が認められた。

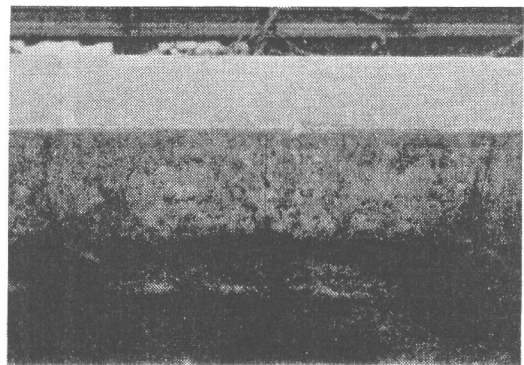


写真-1 供試体の外観 (暴露12年:GRC-5%)

図-2は、各種の防食処理を施した梁のうち、比較的表面の劣化が少ない梁についての暴露年数と表面の変状ならびに解体して取り出した鉄筋の腐食状態を示したものである。このように表面における外観上の劣化が殆ど認められないものでも、腐食が観察された。しかし、これらの腐食の程度(状態)は、防食方法により異なっていた。

GRC-3%の2本の梁の表面には、顕著な劣化は認められなかったが、GRC-5%の1本の梁には、暴露4~5年時点で隅角部に波に運ばれた岩石の衝突によるものと思われる大きなひびわれが発生し、それが劣化を促進し、GRCの部分的な剥離とひびわれが認められた。

ECの場合には、鉄筋のかぶりに関わらず暴露開始時点ではコーティングがコンクリート表面のひびわれを覆っていたが、かぶりが3cmの1本の梁以外の3本の梁は、暴露5年から10年の間に、中央部分のコーティングが徐々に破断し、それが材令の経過とともに次第に拡大し、錆汁の発生が認められた。

暴露期間が10年であるPCMの梁では、表面が若干変色した程度であって、ひびわれなどの変状は認められなかったが、解体して取り出した鉄筋には、腐食が認められた。

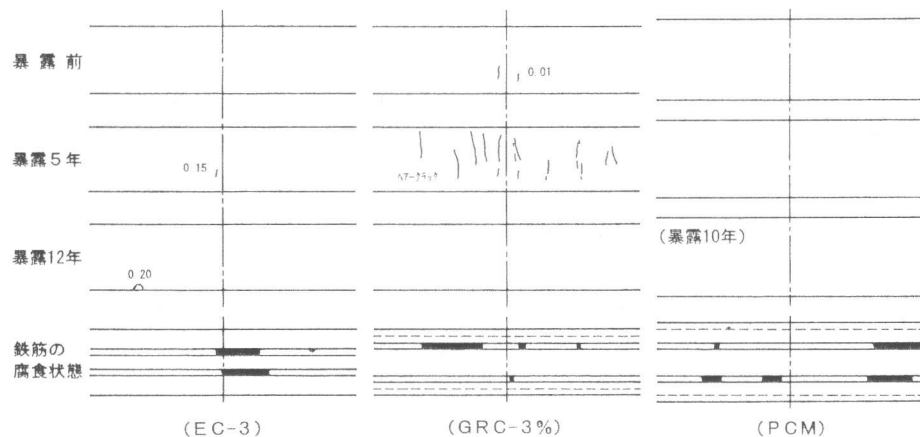


図-2 供試体表面の経時変化と鉄筋腐食

(2)鉄筋の腐食状態

図-3には、これらのコンクリート梁から取り出した鉄筋の腐食面積率を示す。ここで示す腐食面積率は、同種の2本の梁に埋め込まれた4本の鉄筋の最大と最小ならびに平均値を示したものである。この図から、GRC-5以外は平均で10%程度の腐食面積率となっているが、取り出した鉄筋の表面の腐食状態を詳細に観察すると、防食材料の種類によって、その腐食の程度は大きく異なっている。そこで、腐食の程度を表すために、腐食減量を腐食面積で除して求めた腐食度と、腐食面積率の関係を表したものが図-4である。この図から、腐食面積率が同程度であっても腐食度の範囲は大きく異っている。これらの傾向は、暴露5年時点[5]でも認められたことである。

(3)塩化物の浸透

これら防食処理を施したコンクリートへの塩化物の浸透状態を図-5に示す。何れのコンクリートの場合にも、打設面側には防食処理を施していないために、そこからの塩化物の浸透が認められる。一方、防食処理を施した方向からの塩化物の浸透を見ると、防食方法によって塩化物の含有量は若干異っている。ECのようにコーティングが健全な場合には、表面から0.5cmの位置のコンクリートの塩分含有率は、暴露5年時点よりも多くはなっているものの0.07%程度である。これらの塩分は、その塩分分布の傾向から、打設面側から浸透した塩分と考えられる。

ここで注目されるのは、GRCとPCMの防食材料自身の塩化物含有率が極端に大きな値を示していることである。暴露5年時点での塩分含有率は、両者とも0.3%程度[3]であったことから、その後も暴露の経過とともに多量の塩化物を取り込んだものと考えられる。これらの現象を調べる目的で可溶性の塩化物を調べたところ、全塩分に対する可溶性塩分の割合は、コンクリート中の塩化物の割合と同様な値であった。このことは、この種の材料は、表-1に示すように単位セメント量が多いことから、表面から浸透する多くの塩化物を固定し、結果として内部への塩化物の侵入を遮蔽していることが考えられる。また、この防食材料自身の断面方向の塩化物の分布を調べたものが図-6である。約1cmの厚みにおける塩化物は、表層から内部に向かって低下している。

(4)E P M Aによる分析

写真-2は、コンクリート梁断面のE P M Aによ

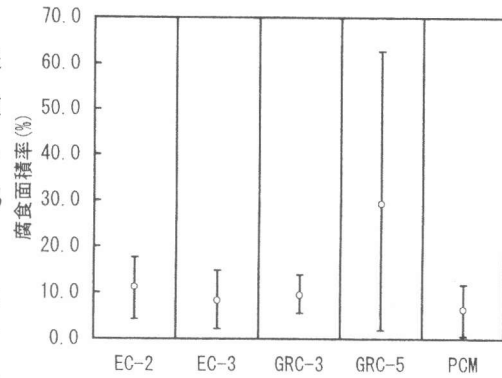


図-3 防食方法と腐食面積率の関係
(海洋暴露：10.12年)

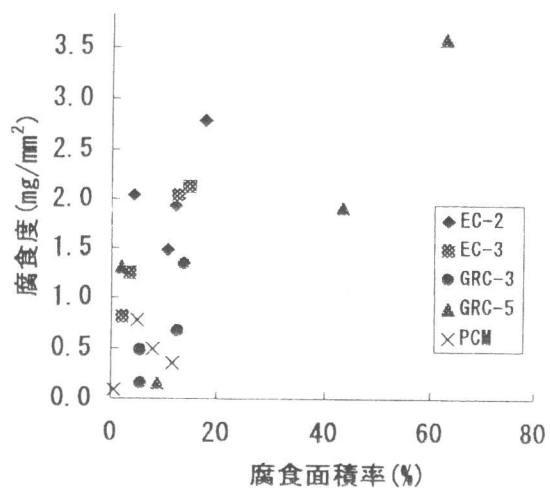


図-4 鉄筋の腐食程度の検討

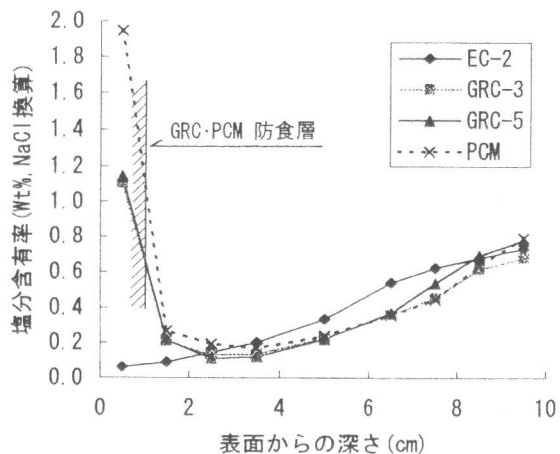


図-5 コンクリート中の塩分含有率 (全塩分)

る塩素の面分析を行ったものである。画面で白く見える部分は相対的に塩素濃度が高く、暗黒になるほど低くなることを示している。

写真-2(a)は、GRC-3%の場合のものであり、写真-2(b)は、PCMのものである。各々の防食材料とコンクリートの界面には、防食材料を通過したと考えられる塩化物がコンクリートに浸透している傾向は認められるものの、防食材料には多くの塩化物が存在し、コンクリート内部への塩化物の浸透を効果的に遮蔽していることが分かる。また、これら防食材料中の塩分は、他の元素(S、Ca、Mg)と結合して複合塩を形成している事をEPMAに付置している画像解析装置の操作により確認している。

(5)防食処理を施したコンクリートの細孔量と細孔径分布
水銀圧入式ポロシメーターにより、防食材料の細孔構造を調べた一例が

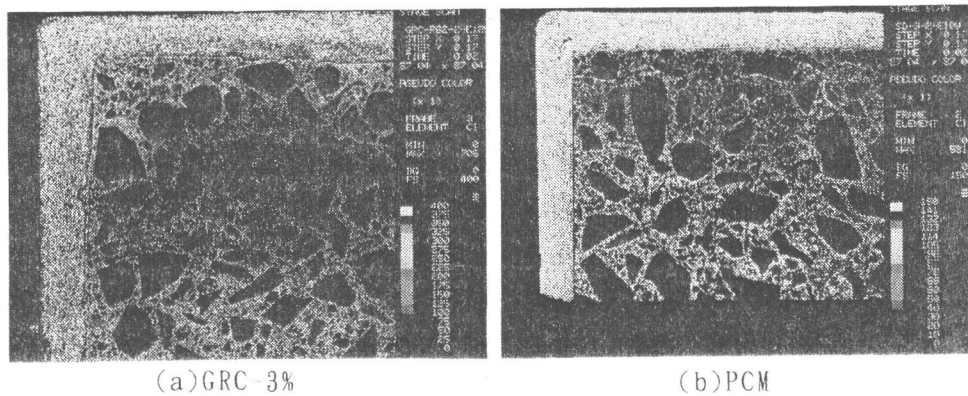


写真-2 EPMAによるClの面分析

図-7である。GRCとコンクリート中の全細孔量は(0.08~0.10cc/cc)程度であったが、PCMの場合には0.22cc/ccと2倍以上の値を示した。また、図-7(a)に示すライニング部分の細孔径分布を見ると、PCMと梁の中心のコンクリートに比べ、PCMは粗大径の空隙が多い事を示している。このことから、表-1に示すように防食材料自身の単位セメント量が多いGRCよりも、PCMに多くの塩化物の拘束(捕捉)がなされたものと考えられる。

(6)付着・接着強度

防食材料とコンクリートとの付着・接着強度を調べたものが図-8である。防食処理を施したかぶり側と側面について調べた4箇所(平均強度で表したものである。付着・接着強度試験での破断箇所を見ると、殆どが母材の引張破壊で破断していた。暴露5年時点よりも全般的に強度の

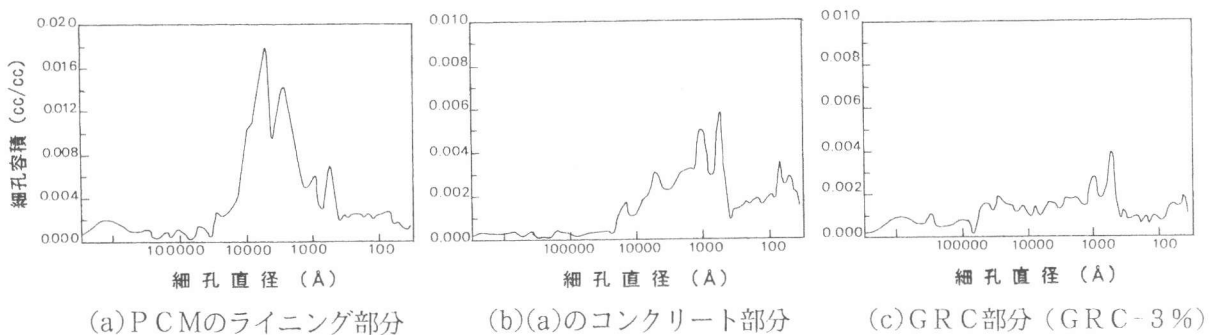


図-7 防食材料等の細孔径分布

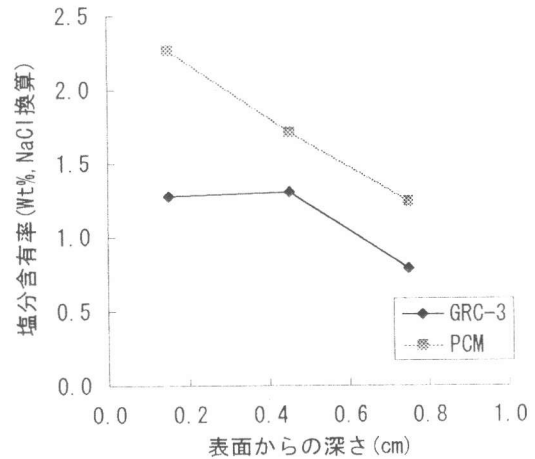


図-6 防食材料中の塩分含有率(全塩分)

低下が認められるものの、ECならびにPCMの付着・接着強度は、長期の暴露にも関わらず十分な強度を示している。また、GRC型枠は、これらの材料の中では低強度を示したが、ガラス繊維の層状間において破壊が生じている。このGRC-5%の場合には、コンクリートと型枠にズレが生じている部分もあり、実際の構造物に適用する場合には、コンクリートとの“なじみ”が問題になると考えられる。

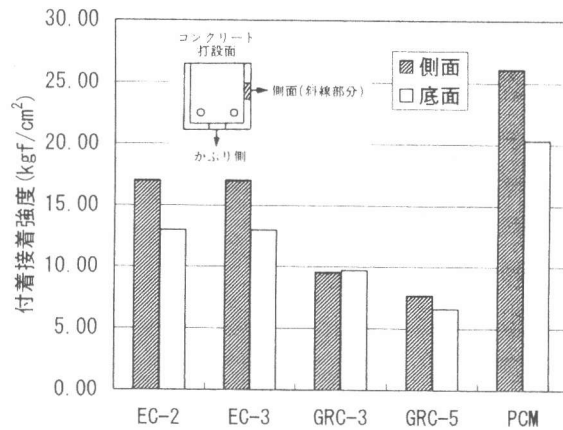


図-8 防食材料の付着・接着強度

4. まとめ

- ①合成高分子材料のコーティングを施したコンクリートでは、暴露5年以降からコーティングの表面劣化やひびわれが生じたものがあつたが、12年間の暴露期間中にコーティング部分が破断しないものもあつた。しかし、このコンクリート中の鉄筋にも腐食が認められた。これは、供試体の仕様から発生したものと思われる。一方、健全なコーティング部分での付着強度ならびに塩分遮蔽効果は十分なものが認められた。
- ②ガラス繊維補強型枠は、ガラス繊維の補強効果により、長期の暴露期間中に生じた鋼材の腐食によるひびわれの発生も拘束していると考えられる。しかし、実際の構造物に適用する場合には、コンクリートとの付着性状の改善やガラス繊維の混入率についての検討を要する。
- ③ポリマーセメントモルタルを防食材料とした場合には、長期間の付着強度が優れ、表面劣化は殆ど認められなかつた。しかし、この材料はGRCと同様に完全に塩分の遮蔽を阻止できるものではないことは、鉄筋の腐食の発生も認められた。

本研究は、防食材料の開発・施工を行っている各社のご協力を得て、長期の海洋暴露実験を行ったものであり、恒和化学工業(株)技術研究所、ショーボンド建設(技術研究所)、旭硝子(株)GRC開発センターの各社からは多大な技術的支援を受けました。ここに記して甚大な謝意を表します。また、分析・解析に際しては、卒論のテーマとして千葉工大卒論生の押山淳一君(小野田ケミコ(株))のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

〈参考文献〉

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)、JCI-R1、1983年2月
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書、1992年10月
- 3) 星野・小林：各種防食方法を適用した鉄筋コンクリートの5年間の海洋暴露実験、コンクリート工学論文集、Vol. 11、1、pp. 621~626、1989年6月
- 4) 星野・魚本・守屋：海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物の浸透と暴露環境に関する検討、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、日本コンクリート工学協会、1994年10月
- 5) 小林・星野：海洋飛沫帯に5年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(Ⅱ)-2種防食の効果-生産研究、Vol. 41、N08、1989年8月