

論文 海洋環境下における撥水材を含浸させたコンクリートの性質

迫田恵三*1・竹田宣典*2・外岡政則*3・山根千学*4

要旨: コンクリート構造物の早期劣化が問題となっており, その構造物の補修や耐久性向上のために各種の方法が実施されている。その一つの方法として水分や塩分および酸性雨などの劣化因子の浸透を抑制するために, コンクリート表面にシラン系の撥水材を塗布する工法が行われている。その効果についてはこれまで幾つかの報告がなされているが, 長期の暴露結果については十分明らかにされていない。本研究は, シラン系の撥水材を塗布したコンクリート供試体を 15 年間海洋環境下に暴露し, その材料の塗布効果について明らかにすることを目的に行った。

キーワード: 撥水, シラン, 海洋環境, 塩化物イオン量, 中性化, 耐久性

1. はじめに

コンクリート構造物は, 各種の環境下に設置され, それにともなってその構造物には各種の劣化因子が作用している。とりわけ, 海洋環境は海水の塩分の影響によりコンクリートへの化学的浸食や鉄筋の腐食など, コンクリート構造物の耐久性を著しく損ねると言われている。海水の浸透を抑制する方法としては, コンクリート自身を密にしたり, その表面を樹脂で被覆するなどが効果的であるとされている。シラン系の撥水材も水分のコンクリート中への浸透を妨げる作用により, 遮塩性やアルカリ骨材反応を抑制する方法として, これまでその効果について報告されている^{1) 2) 3)}。しかしながら, 高分子の一種である撥水材は, 自然環境下では紫外線や乾湿の繰り返し作用などにより劣化することも考えられるが, 長期の暴露実験結果に対する報告は極めて少ない¹⁾。

本研究は, 2 種類のシラン系撥水材を塗布したコンクリート供試体を, 15 年間海洋環境下に暴露した場合, 撥水材がコンクリートの物性, 塩分浸透および鉄筋の腐食に及ぼす影響などを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したセメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³), 細骨材は, 木更津産 (密度 2.58g/cm³, 吸水率 1.64%, FM 2.67), 粗骨材は碎石骨材 A (密度 2.55g/cm³, 吸水率 2.09%, FM6.49, Gmax20mm) と碎石骨材 B (密度 2.65 g/cm³, 吸水率 1.09%, FM6.20, Gmax20mm) を使用した。撥水材 A は表-1 に示すように反応性シランを主成分とし, コンクリートに塗布することによって重合反応しシリコンポリマーを形成する。他方, 撥水材 B はシラン系化合物を主成分としており, 酸や塩基の存在下で水と反応してシラノールを生成する。これがコンクリートに深く浸透して水分と反応して活性化されると言われている。

表-1 シラン系防水材の仕様

表示名	シラン系A	シラン系B
主成分	反応性シラン特殊樹脂	特殊シラン系化合物
比重	0.84	0.84
塗布量	400 g/m ²	400 g/m ²
塗布材齢	14日	14日
塗布方法	3回に分けて刷毛塗り	3回に分けて刷毛塗り

*1 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

*2 榊大林組 技術研究所 土木材料研究室 工博 (正会員)

*3 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (正会員)

*4 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (正会員)

2.2 配合

コンクリートの配合を表-2に示す。配合Aの水セメント比は55%、配合Bでは60%に設定した。配合A、Bのスランプは15、18cm、空気量は2.0、2.6%となった。

表-2 コンクリートの配合

記号	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
配合A	20	55	46	181	330	828	971	0
配合B		60	48	170	282	816	1016	2.83

2.3 供試体

供試体は、圧縮強度用、塩分測定用および鉄筋の腐食試験用の3種類を用いた。圧縮強度試験用供試体は直径100mm、高さ200mmの円柱供試体、塩分測定用供試体は直径150mm、高さ150mmの円柱供試体と縦90mm、横180mm、長さ1800mmの角柱供試体を用いた。鉄筋の腐食用供試体は、図-1に示したような角柱供試体のかぶり40mmにD10の鉄筋を埋め込んだ。角柱供試体は配合Aのみとした。

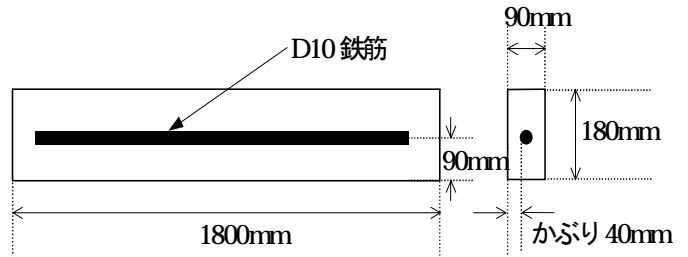


図-1 角柱供試体寸法及び鉄筋位置

2.4 養生方法および暴露環境

暴露前の供試体の性質を知るために湿布養生1日後に脱型し、材齢28日まで標準養生を行った。撥水材の塗布は、材齢14日に3回に分けて刷毛塗りを行ったが塗布量は撥水材A、Bとも400g/m²である。

供試体の暴露は、表-3に示すように静岡県清水市の清水港外港防波堤上と防波堤脇の水深11mの海中で行った。温暖地域として知られている清水市の平均気温は17°Cで、冬季でも平均気温が5°Cを越え、氷点下になることはまれである。また、年間降水量も2700mmと日本の平均降水量より多い。防波堤の暴露環境は、防波堤の外海に面したところに消波ブロックが設置されており、気象条件によっては波しぶきを受ける。

表-3 暴露環境

暴露場所	環境区分	環境条件
静岡県清水市 防波堤上・下	海上大気中	LWL+2.5mの位置
	防波堤上	強風時に波しぶきを受ける
年平均気温 17.0°C	海中	平均海水温度 18.4°C
年間降水量 2700mm	水深11.0m	pH 8.29

表-4 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法
単位容積質量	円柱供試体の質量を単位容積で除し算定
圧縮強度	円柱供試体(Φ100×200mm)を暴露終了後、付着物を除去し、JIS A 1108に準じ試験実施
静弾性係数	圧縮荷重から求めた応力と、圧縮変形から求めたひずみによる割線係数より算定
中性化	コンクリート破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、変色しない深さを測定
含水率	圧縮試験終了後の重量と48時間110°Cで乾燥後の重量より算定
塩化物イオン量	塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法(硝酸銀溶液)による全塩分定量分析
鉄筋の腐食	RC供試体を割裂し、腐食箇所を写しとり、腐食面積率により評価
鉄筋の自然電位	水を含んだスポンジを介して対象とする鉄筋の直上のコンクリート表面と照合電極(硫酸銅)を接触させ、電位を測定

2.5 測定項目及び測定方法

測定項目、測定方法を表-4に示す。撥水材を塗布しない供試体は、暴露開始から4年、8年、15年に回収した。撥水材を塗布した供試体は、暴露15年で回収し、表-4に示すような測定を行った。海中に暴露した供試体は回収後、

圧縮強度試験前まで海水に浸漬した。塩化物イオン量の分析は、コアドリルを用いて表面から20mm 間隔で粉末状の試料を採取したもので行った。鉄筋の腐食は、腐食面積率を用いて評価した。撥水材がコンクリートに及ぼす影響は、撥水材塗布の有無で比較検討した。

3 実験結果及び考察

3.1 単位容積質量

単位容積質量の結果を図-2に示す。暴露環境がコンクリートの単位容積質量に及ぼす要因としては、海洋環境下では乾湿の繰り返し、海水の硫酸塩などの化学的浸食や波浪などによる物理的作用が考えられる。暴露前の単位容積質量 2.35, および 2.36 の値と比較すると撥水材の塗布の有無にかかわらず、15年間海上大気中に暴露したものは、単位容積質量が低下している。これは撥水材を塗布しないものは、乾湿繰り返しによる単位容積質量の低下が生じ、撥水材塗布のものはコンクリート内部からの水蒸気の放出が影響したものと考えられる。他方、海中に暴露した場合、撥水材塗布なしの方が、塗布したものより大きい。この原因としては、撥水材無塗布の場合、海水が容易にコンクリートに浸透し、塗布の場合、海水の浸透を抑制したことが原因と考えられる。

3.2 圧縮強度

暴露前の材齢 28 日と撥水材無塗布の圧縮強度およびその経年変化の結果をそれぞれ表-5, 図-3に示す。図からも明らかなように全体的には、圧縮強度は暴露年数 8 年まで暴露年数の経過とともに増加し、暴露 8 年から 15 年にかけて低下する傾向がみられる。海上大気中に暴露したものは、降雨の影響によりセメントの水和が進行し、強度がある年数までは増加するものと考えられる。暴露地の清水市は温暖な気候で凍結融解作用の影響は無視できるので、暴露 8 年から強度が低下したのは、乾湿の繰り返し作用によりコンクリートが収縮、膨張し、その

表-5 暴露前のコンクリートの性質

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢28日試験		
			単位容積質量 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
配合A	15.0	2.0	2.36	33.1	3.39
配合B	18.5	2.6	2.35	30.5	2.89

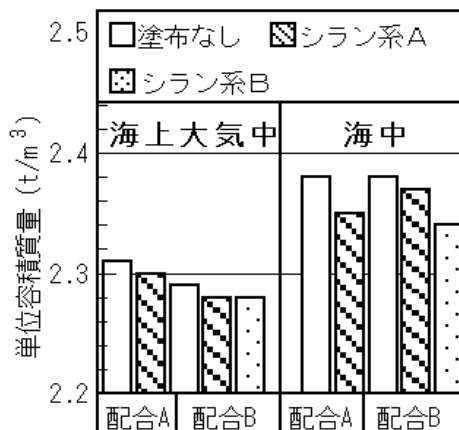


図-2 暴露 15 年における単位容積質量

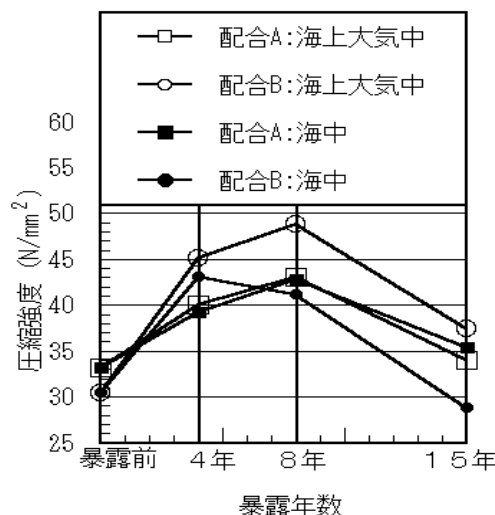


図-3 圧縮強度の経年変化

結果コンクリート内部に微小クラックが発生し、強度が低下したものと考えられる。他方、海中に暴露したのは、海水がコンクリート中に浸透し水酸化カルシウムの溶出と、エトリンガイトの生成により強度が低下したものと考えられる。これについては著者らが同一環境における暴露実験からも同様な結果を得ている⁵⁾。

図-4は暴露15年における各供試体の圧縮強度を示している。海上大気中に暴露した場合、撥水材塗布の有無で強度を比較すると、塗布したものの強度が低い結果となった。これは撥水材を塗布したことで外部からの水分の浸透を抑制したこと、内部からの水蒸気の放出が影響したものと考えられる。これについては著者らが酸性雨の環境下の屋外で3年間暴露した実験でも、同様な結果を得ている⁴⁾。一方、海中に暴露した場合、撥水材を塗布した方が塗布しないものより、配合Aで19%、配合Bで36%、29%大きくなっている。これは塗布したことによって海水の化学作用の影響を少なくしたことが原因と考えられる。

3.3 静弾性係数

図-5は暴露15年における各供試体の静弾性係数を示している。コンクリートの静弾性係数に及ぼす要因としては、配合、骨材の弾性係数、骨材容積などが挙げられるが、コンクリートの圧縮強度とも相関があると言われている。図-4の圧縮強度と同様海上大気中に暴露した場合には、塗布なしの静弾性係数が塗布したものより大きい。他方、海中に暴露した場合には、塗布した方が塗布しないものより大きくなった。この原因については圧縮強度で述べたことと同じことが考えられる。

3.4 中性化深さ

暴露15年の中性化深さを図-6に示す。海上大気中に暴露した場合、撥水材を塗布したものの中性化深さは、無塗布のものと比較して、配合Aで約4倍、配合Bでは約2.5~3倍と

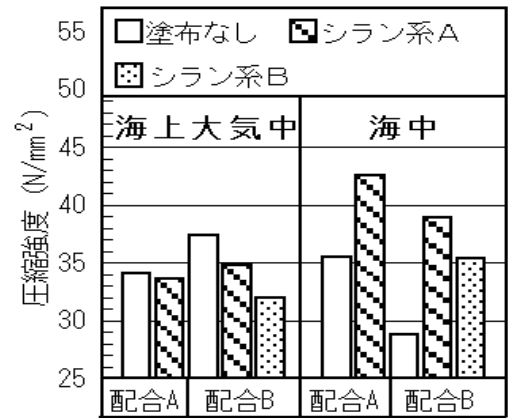


図-4 暴露15年における圧縮強度

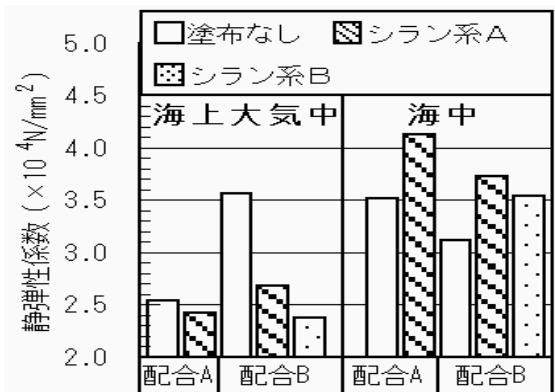


図-5 暴露15年における静弾性係数

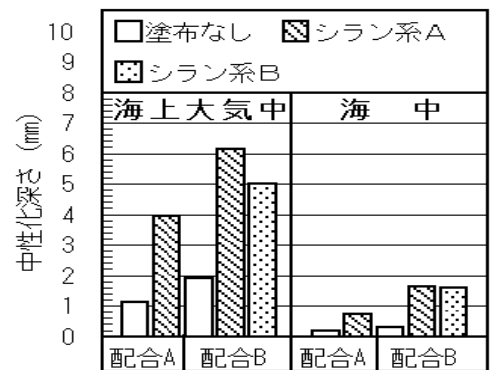


図-6 暴露15年における中性化深さ

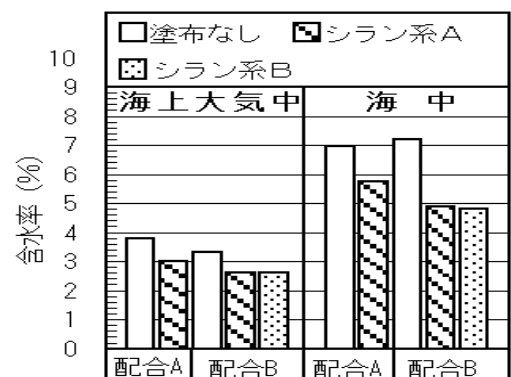


図-7 暴露15年における含水率

なっている。撥水材塗布なしで屋外暴露の場合には、降雨によりコンクリートが吸水することによって炭酸化の進行が遅れることが予想される。これに対して、撥水材塗布の場合には、水分の浸透を妨げることと、コンクリート内部からの水蒸気が蒸発して、結果的に二酸化炭素の浸透を容易にしたものと考えられる。海中に暴露した場合には、二酸化炭素の量が少ないことと、コンクリートが湿潤していることから中性化深さは少なく、また撥水材塗布の有無の影響は見られない。

3.5 含水率

海洋環境暴露 15 年における撥水材の効果を検証するために、コンクリートの含水率を求めた。図-7の海上大気中の場合には、割裂供試体を 48 時間水中浸漬し、24 時間 110℃ 炉乾燥した結果を示している。図からも明らかなように撥水材を塗布した方が無塗布のものより小さくなっている。また、海中に暴露した場合においても塗布したものの含水率が小さくなっており、海洋環境下に 15 年間暴露しても、撥水材の効果が継続していることを示している。

3.6 塩化物イオン量

図-8, 9は暴露 15 年における塩化物イオン量の結果を示している。塩化物イオン量は、コンクリートの重量に対する重量百分率で表している。海上大気中に暴露した場合、全体的に塩化物イオン量は少ないが、撥水材を塗布した場合、塗布しないものより約 1/10 少ない。海中に暴露した場合、塩化物イオン量は、海上大気中に暴露した場合と比べてかなり大きい。撥水材無塗布の場合、コンクリートの表層 20mm まで 1.03%、60mm では 0.49%の塩分量となっている。これに対して、塗布した場合には、同じ深さで無塗布のそれぞれ約 37%、29%となっている。以上のように暴露環境に関わりなく暴露 15 年においても撥水材の遮塩効果が現れているものと類推される。

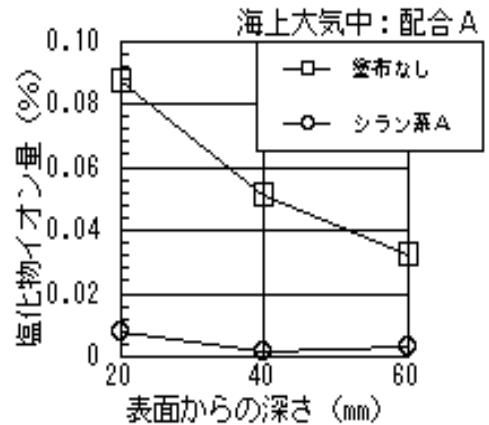


図-8 塩化物イオン量 (海上大気中)

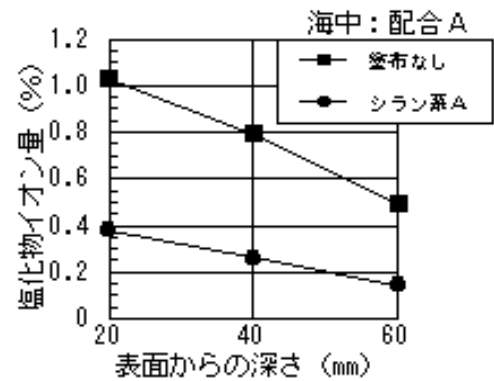


図-9 塩化物イオン量 (海中)

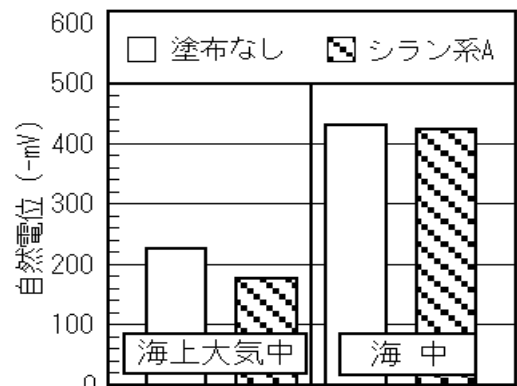


図-10 暴露における自然電位

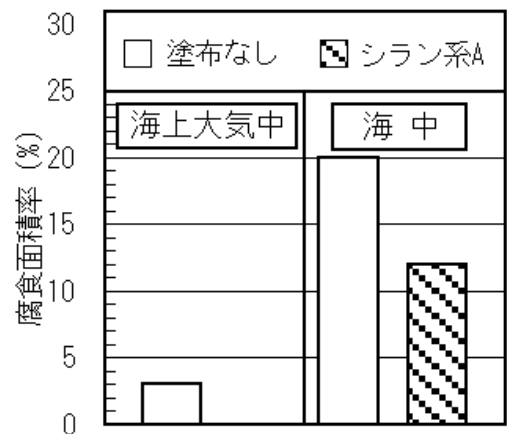


図-11 鉄筋の腐食面積率

3.7 自然電位

図-10は自然電位の結果を示す。この自然電位の値は、5cm 間隔で15点測定した結果の平均を示している。ASTM では自然電位の値が-390mV より卑であると90%以上の確率で鉄筋の腐食が生じているとしている。海上大気中に暴露した場合、撥水材の塗布の有無にかかわらず自然電位は、-350 mV より貴になっている。他方、海中に暴露した場合、塗布の有無に関わらず自然電位は、-400 mV より卑となった。

3.8 鉄筋腐食

供試体のかぶり40mm に埋め込んだ鉄筋腐食の結果を図-11に示す。海上大気中に暴露した場合、撥水材を塗布した供試体の鉄筋の腐食はみられなかった。これに対して無塗布のものは、3%の腐食が観察された。これは撥水材塗布の場合、遮塩効果により塩化物イオン量が少なかったことと、無塗布の場合、かぶり40mm で0.05%の塩化物イオン量が存在したことが原因と考えられる。一方、海中に暴露した場合、撥水材塗布の有無に関わらず腐食がみられた。これは図-9に示した塩分量の結果からも明らかのように、鉄筋を腐食させるに十分な塩分量が含有したことが原因と考えられる。しかしながら、海中暴露した場合でも撥水材の遮塩効果によって塩化物イオン量は、無塗布の場合に比較して小さくなった。

4. まとめ

シラン系撥水材を塗布したコンクリート供試体を海洋環境下に15年間暴露した結果、撥水材がコンクリートの性質に及ぼす影響について、以下のような知見が得られた。

- (1) 海上大気中に暴露した場合、撥水材を塗布した圧縮強度は無塗布のものより小さくなるが、海中に暴露した場合には逆に大きくなる。
- (2) 海上大気中に暴露した場合、撥水材を塗

布すると遮水作用とコンクリートの内部からの水蒸気の蒸発により、中性化深さは、無塗布のものより大きくなる。

- (3) 撥水材を塗布した場合の遮塩効果は、海上大気中、海中に暴露した場合、無塗布の場合と比較してかなり大きい。
- (4) 撥水材を塗布した場合の鉄筋腐食は、無塗布のものと比較して大きく低減できる。

撥水材などの高分子材料の耐候性については、まだ十分明らかにされていないが、15年間の海洋環境下での暴露試験の結果、撥水材の効果が継続しているものと考えられる。

参考文献

- 1)久保善司・玉井譲・栗原慎介・宮川豊章：シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性，コンクリート年次論文集，Vol. 23，No. 1，2001，pp 421-426
- 2)森田修一・近藤允：表面処理剤によるアルカリ骨材反応抑制効果に関する実験報告，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，1997，pp 943-948
- 3)福田英夫・野田和明・多記徹・守屋進：被覆材によるアルカリ骨材反応の抑制，コンクリート年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，1995，pp 943-948
- 4)迫田恵三・天沼邦一・鈴木健弘：酸性雨環境下に屋外暴露したコンクリートの性質，コンクリート年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，1994，pp 913-918
- 5)竹田宣典・十河茂幸・迫田恵三・出光隆：種々の環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 599/V-40，1998，pp 91-104