

論文 表面含浸材のコンクリート中の鋼材腐食抑制効果に関する実験的検討

酒井 貴洋^{*1}，福手 勤^{*2}，内藤 英晴^{*3}，澤田 巧^{*4}，金子 洋一^{*5}

Experimental study on inhibiting effect of steel corrosion by surface penetrants

Takahiro SAKAI^{*1}，Tutomu FUKUTE^{*2}，Hideharu NAITO^{*3}，Takumi SAWADA^{*4} and Yoichi KANEKO^{*5}

要旨：筆者らはこれまで，コンクリートへの表面含浸材の塗布が塩化物イオンの浸透を抑制し，内部鋼材の腐食抑制に有効であることを塩水浸漬や電気泳動試験での塩化物イオン拡散係数の測定結果をはじめとした各種室内実験により検証してきた．次のステップとして，表面含浸材の鋼材腐食抑制効果を実際の塩害環境下で確認することを目的に，内部に鉄筋を埋め込んだコンクリートの表面に表面含浸材を塗布した供試体を海水が定時に噴霧される塩害環境下に曝露し，長期的な観察を行っている．本報告では曝露から約1年4ヶ月が経過した時点での内部鋼材の腐食状況に関する計測結果について述べる．

キーワード：表面含浸材，鋼材腐食抑制効果，曝露実験，塩害環境，塩化物イオン

1. はじめに

海洋・港湾構造物は岸壁・護岸や防波堤・臨港道路など様々な用途に利用されている．例えば岸壁は主要な係留施設として，また護岸や防波堤は防災施設として，臨港道路は港湾物流の動脈として重要な役割を担う．四方を海に囲まれている我が国においては，輸出入取扱貨物量の99%以上が海上輸送され，国内貨物輸送に関しても約3分の1を海運が担うことから，物流の拠点・動脈となる海洋・港湾構造物は経済の発展に欠かせない施設である．このため，これらの長寿命化を図ることはわが国全体の大きな課題として認識されつつある．

ここでコンクリート表面に塗布することでその含浸層に撥水性を付与，または緻密化を促し，劣化因子の侵入を抑制することのできる材料で

ある表面含浸材が注目を集めていることは周知の通りである．表面含浸材は陸上構造物のように，常時気中におかれている環境で用いれば十分に劣化因子の侵入抑制効果が認められている．同様に，海洋・港湾環境下に存在するコンクリート構造物に適用することができれば，これら構造物の長寿命化に有用と考えられるが，海水による影響を直接受けるような環境における性能は，必ずしも明らかにされているとは言えない．このような背景から，著者らは表面含浸材の海洋・港湾コンクリート構造物における適用性の把握を目的とした研究を進めている．本稿ではこの研究の一部として実施している表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を海水噴霧試験場に曝露し，内部鋼材の腐食特性を電気化学的手法により測定した結果について述べる．

*1 五洋建設株式会社 技術研究所 土木材料チーム 担当課長

*2 東洋大学 都市環境デザイン学科 教授

*3 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部 専門部長

*4 五洋建設株式会社 中国支店 工事主任

*5 株式会社日興

2. 実験概要

本稿で述べる曝露実験は、試験室内で製作した供試体を、海水が1日に4時間を2回ずつ散布される海水シャワー曝露試験場(図-1)に曝露し、現在曝露後約2年が経過している。曝露試験場は神奈川県横須賀市に位置し、年平均気温 15.8℃、年間平均降水量 1688.6mm(気象庁HPより)、防波護岸で仕切られた海岸線から数mの箇所に位置する。モニタリング項目は、コンクリートのひび割れ等の発生を把握するための目視確認・内部鋼材の自然電位および分極抵抗である。測定頻度は、目視確認・自然電位については曝露直前を含め、曝露4ヵ月毎、また分極抵抗については1年4ヶ月经過した時点で測定を行った。



図-1 海水シャワー曝露試験状況

2.1 実験供試体

供試体は全2種類であり、鉄筋かぶり(cover)が39mmとなるように埋め込んだ中心部の鋼材はD22(SD345)で黒皮は除去していない。また塩化物イオンによる内部鋼材の腐食促進を目的として水セメント比(W/C)は60%に設定した。

2種類の供試体は各々普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメントB種(BB)を用いたものを作製した。なお一方については、著しい内部鋼材の腐食環境とするため、作製時に塩化物イオンが 10kg/m^3 となるよう練混ぜ時にNaClを混入させた。コンクリート打込み後は封緘養生を行い、材齢2週間で脱型した後、2週間気

中養生を行った。裏部・上面・下面はエポキシ樹脂で被覆し、その1週間後に開放面である2側面に含浸材を塗布した。含浸材の塗布後約2ヶ月間気中養生を行った後で曝露を開始した。含浸材の持つ撥水作用によって塗布面での自然電位測定が困難となることが懸念されたため、エポキシ樹脂で被覆を行った上面の中心に自然電位測定の際にコンクリート表面に直径2cm程度の小窓を設けた。この小窓は、測定時以外はアルミテープにより密封されている。供試体の概要、コンクリートの使用材料および配合をそれぞれ図-1および表-1, 2に示す。供試体は種類ごとに2体ずつ作製した。なお供試体No.の頭文字がシリーズを表し、二文字目のアルファベットがセメント種類(N:普通ポルトランドセメント, B:高炉セメントB種)を表す。

表-1 使用材料

材 料	摘 要
W	地下水
C(N)	普通ポルトランド 密度: 3.16g/cm^3
C(BB)	高炉セメントB種 密度: 3.04g/cm^3
S	粗粒率: 2.80 表乾密度: 2.56g/cm^3
G	実績率: 62.5 表乾密度: 2.58g/cm^3
Ad	AE減水剤(標準型 種)

表-2 コンクリートの配合

No.	W/C	単位量(kg/m^3)					
		W	C	S	G	Ad	NaCl
1N1~5	60%	164	274	827	983	3.01	0
1B1~5		161	269	832	983	2.96	0
2N1~5		164	274	827	983	3.01	16.47
2B1~5		161	269	832	983	2.96	16.47

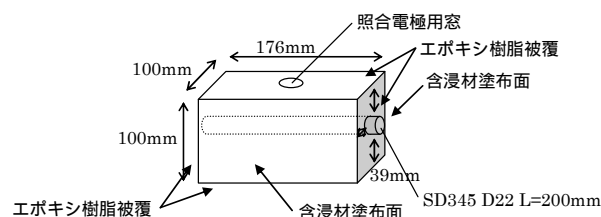


図-2 供試体の概要

2.2 含浸材

使用した含浸材を表-3に示す。含浸材Aはけい酸ナトリウム系の含浸材であり、含浸材BおよびCはシラン系含浸材である。含浸材Eはけい酸ナトリウム系を塗布した翌日にシラン系含浸材を塗布する2液併用型の含浸材である。供試体の種類およびこれに塗布した含浸材の一覧を表-4に示す。

3. 測定結果

3.1 自然電位

シリーズ1および2の自然電位は鉛照合電極を供試体上面に設けた小窓に接触させ、鉄筋の端部と接続することで測定した。シリーズ1・2の自然電位測定結果を図-3~6に示す。測定結果は種類ごとの平均値であり、ここで示す自然電位の値はCSE換算値である。その結果、シリーズ1(初期塩分なし)とシリーズ2(初期塩分あり)で傾向は大きく異なった。シリーズ1については供試体作製直後の曝露前の時点では全ての供試体で-120mv~-130mv程度であり、ASTMの基準では「90%以上の確率で腐食なし」と判定される範囲の値を示した。2回目以降の

測定では、全ての供試体において「腐食なし」と判定される範囲ではあるものの、併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体とそれ以外で異なる傾向を示した。併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体はほぼ初期値と同等であるのに対して、それ以外は-150mvから-200mvの範囲まで低下した。またBBを用いたものはNを用いたものに比較して若干貴な値を推移する傾向が認められた。シリーズ2については、供試体作製直後の曝露前の時点で全ての供試体で-350mv程度であり、ASTMの基準では「不確定」から「90%以上の確率で腐食あり」と判定される境界程度の値を示した。これについては、供試体作製時から塩化物イオンが10kg/m³混入されており、初期の段階から鉄筋の腐食が疑われる状況にあったと推察される。2回目以降の測定では全ての供試体において、自然電位が低下する傾向が認められた。特に無処理およびけい酸塩系含浸材を塗布した供試体において自然電位が大きく低下する傾向であった。

3.2 コンクリート抵抗および分極抵抗

シリーズ1・2で分極抵抗試験装置を用いて1

表-3 含浸材の種類

種類	主成分	主成分濃度	分類	塗布量	塗布回数
A	けい酸ナトリウム	23%	水系	200g/m ²	2
B	アルコキシシロキサン	50%	溶剤系	200g/m ²	2
C	アルキルアルコキシシラン ・ポリオルガノシロキサン	80%	水系	200g/m ²	1
E	けい酸ナトリウム +アルコキシシロキサン	23+50%	水系+溶剤系	150g/m ² +100g/m ²	2+1

表-4 供試体一覧

No.	含浸材	No.	含浸材	No.	含浸材	No.	含浸材
1N-1	無処理	1B-1	無処理	2N-1	無処理	2B-1	無処理
1N-2	A	1B-2	A	2N-2	A	2B-2	A
1N-3	B	1B-3	B	2N-3	B	2B-3	B
1N-4	E	1B-4	E	2N-4	E	2B-4	E
1N-5	C	1B-5	C	2N-5	C	2B-5	C

供試体につき含浸材を塗布した2面で計測を行った。コンクリート抵抗の測定結果を図-7~10に、分極抵抗の測定結果を図-11~14に示す。

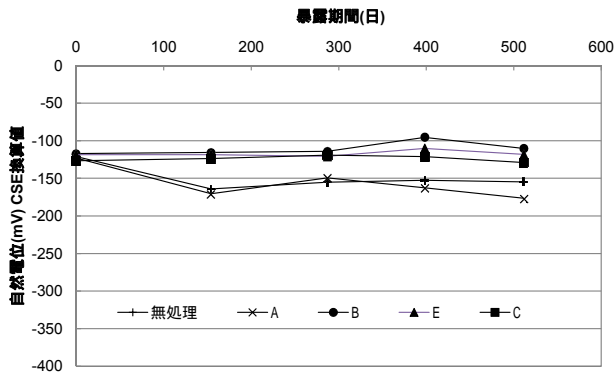


図-3 自然電位 (シリーズ 1N)

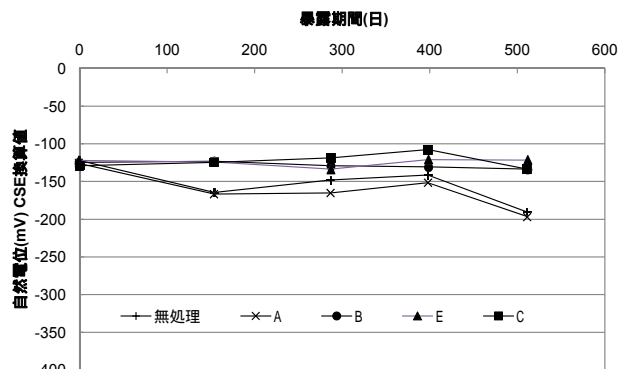


図-4 自然電位 (シリーズ 1B)

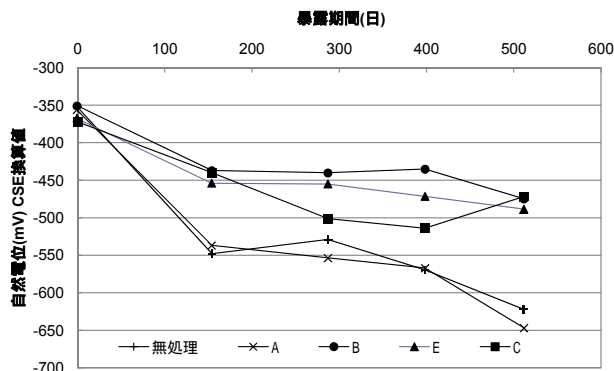


図-5 自然電位 (シリーズ 2N)

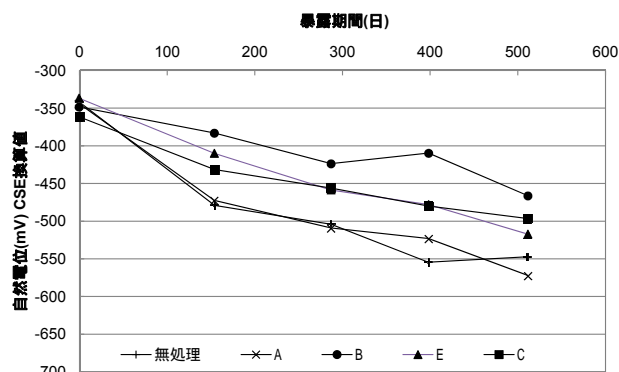


図-6 自然電位 (シリーズ 2B)

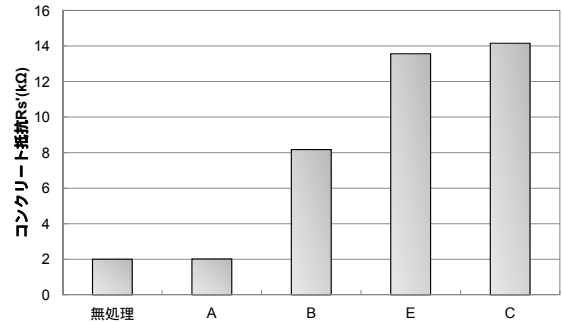


図-7 コンクリート抵抗 (シリーズ 1N)

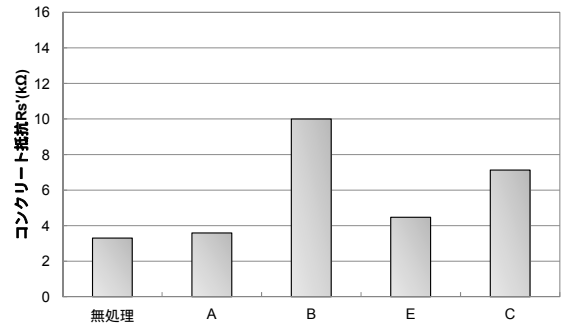


図-8 コンクリート抵抗 (シリーズ 1B)

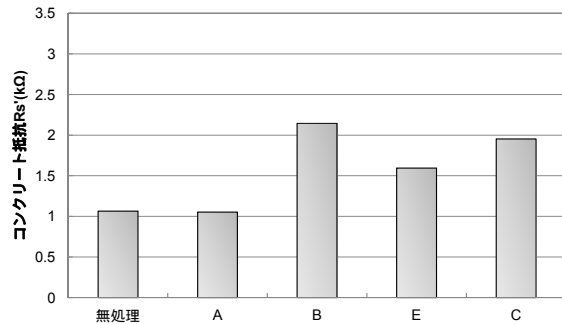


図-9 コンクリート抵抗 (シリーズ 2N)

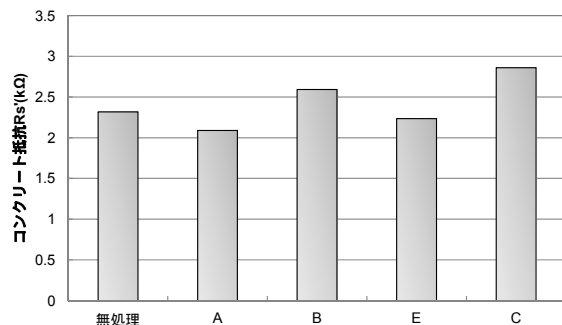


図-10 コンクリート抵抗 (シリーズ 2B)

測定結果は種類ごとに平均した値とし、測定値を平均する際には、ひび割れありのものと測定ミスによるデータを除外した。

コンクリート抵抗は、シリーズ1(初期塩分なし)とシリーズ2(初期塩分あり)で大きく傾向が異なった。シリーズ1については、無処理またはけい酸塩系を塗布した供試体のコンク

リート抵抗が小さく，併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体は，無処理またはけい酸塩系を塗布した供試体よりも大きな値を示した．これはシラン系含浸材が撥水性能を与えられていることから，コンクリート内部の水分が相対的に少なかったと推察され，これがコンクリート抵抗を大きくする一因と考えられた．

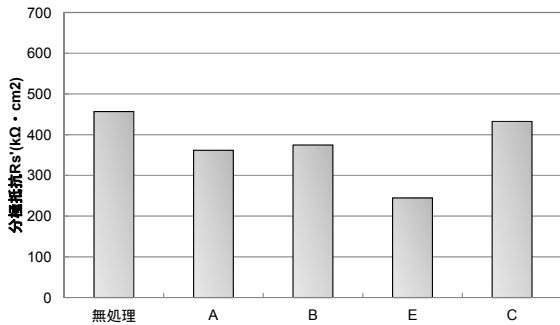


図-11 分極抵抗 (シリーズ 1N)

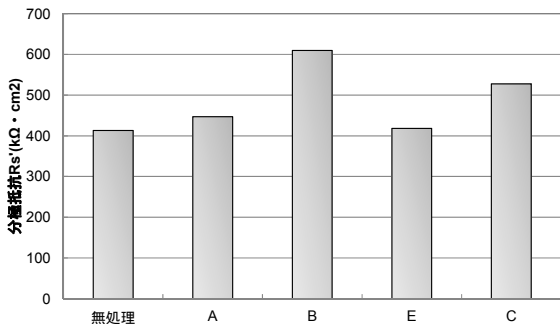


図-12 分極抵抗 (シリーズ 1B)

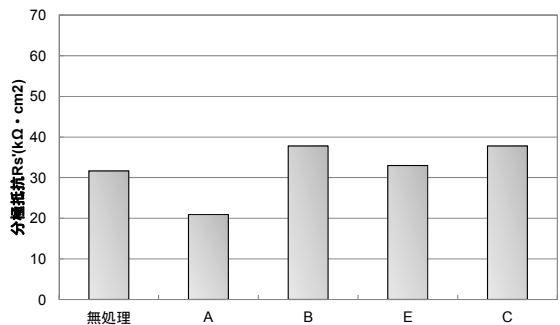


図-13 分極抵抗 (シリーズ 2N)

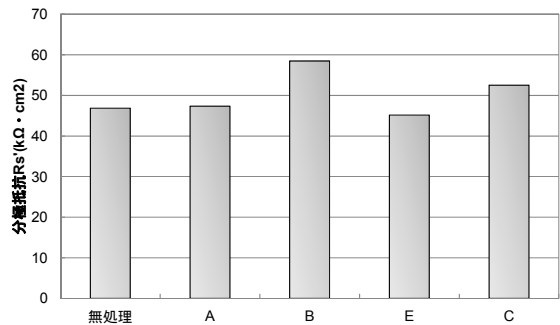


図-14 分極抵抗 (シリーズ 2B)

シリーズ 2 はシリーズ 1 よりも 1 オーダー程度低い値であった．また塗布材料ごとの傾向はほとんど見られないものの，シリーズ 1 と同様に無処理またはけい酸塩系を塗布した供試体のコンクリート抵抗が小さくなっている傾向が若干ではあるが確認できた．けい酸塩系のみを塗布した A 供試体は無処理とさほど変わらない傾向であるが，これは何らかの理由により主成分であるけい酸ナトリウムとコンクリート中の水酸化カルシウムとの反応が不十分であり，コンクリート表層の空隙が充分塞がれなかったことが挙げられる．このため，けい酸塩系含浸材の施工では水和反応がある程度進行した材齢以降に塗布するなど，本来の性能を発揮させるための方策の検討も重要と考える．

分極抵抗についても，シリーズ 1 (初期塩分なし) とシリーズ 2 (初期塩分あり) の傾向は大きく異なった．シリーズ 1 の分極抵抗は $400 \text{ k} \cdot \text{cm}^2$ 程度の値を示し，CEB による判定基準では「不導体状態(腐食なし)」と判断される「 $130 \sim 260$ より大」の範囲であった．シリーズ 2 では $20 \sim 60 \text{ k} \cdot \text{cm}^2$ 程度を示し，「低～高程度の腐食速度」と判定される範囲を示した．分極抵抗はコンクリート抵抗との相関が高いが，塗布材料ごとで明確な傾向は認められない一方で，併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体はコンクリート抵抗と同様に無処理またはけい酸塩系含浸材を塗布したものとほぼ同等か，あるいは大きな値を示した．

3.3 鉄筋腐食量の推定

求めた分極抵抗値から式(1)を用いて腐食電流密度を推定した．

$$I_{corr} = K \cdot \left(\frac{1}{R_p} \right) \quad (1)$$

ここで， I_{corr} は腐食電流密度 (A/cm^2)， R_p は分極抵抗 ($\text{k} \cdot \text{cm}^2$)， K は定数 (V) である．なお定数 K には 0.026V を用いた¹⁾．腐食減量は材齢初期から腐食電流密度は一定と仮定して

表-5 腐食減量（試算値）

No.	腐食減量 (mg/cm ²)	No.	腐食減量 (mg/cm ²)	No.	腐食減量 (mg/cm ²)	No.	腐食減量 (mg/cm ²)
1N-1	0.8	1B-1	0.8	2N-1	10.5	2B-1	7.2
1N-2	0.9	1B-2	0.8	2N-2	17.2	2B-2	7.1
1N-3	0.9	1B-3	0.6	2N-3	10.1	2B-3	6.5
1N-4	1.4	1B-4	0.8	2N-4	10.4	2B-4	7.6
1N-5	0.8	1B-5	0.6	2N-5	10.1	2B-5	6.3

時間積分することにより推定した。腐食電量は全て鉄の腐食反応によるものと仮定し、ファラデーの第2法則を用いて算出した²⁾³⁾⁴⁾。試算した腐食減量の一覧を表-5に示す。推定腐食減量は、シリーズ1（初期塩分なし）よりもシリーズ2（初期塩分あり）のほうが大きな値であり、これについても初期塩分混入の影響が認められた。また塗布材料による大きな差異は見られない一方で、セメント種類ではNよりもBBの腐食減量が若干少ない値を示した。これはBBを用いたことでNの場合と比べてコンクリート組織が緻密となり、鋼材腐食の一要因である酸素の供給量に違いが生じたことが原因と推察される⁵⁾。

4.まとめ

- (1)初期塩分混入供試体の自然電位は曝露当初から腐食が疑われる数値を示し、期間が経過するにつれ、その値はさらに低下した。また初期塩分混入の有無にかかわらず、併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体よりも無処理またはけい酸塩系を塗布した供試体のほうが自然電位低下の程度は大きい。
- (2)コンクリート抵抗および分極抵抗は、自然電位と同様、初期塩分を混入させた供試体において腐食が疑われる数値を示した。また塗布材料ごとでも、自然電位の結果同様に併用系を含めたシラン系含浸材を塗布した供試体よりも無処理、またはけい酸塩系を塗布した供試体のほうが小さい数値を示した。
- (3)試算した鉄筋腐食量は初期塩分混入の供試体がより大きな値を示した。塗布材料による

明確な差異は見られない一方で、セメント種類ではNよりもBBの腐食減量が若干小さい傾向が認められ、腐食を助長する酸素の供給量に違いが生じたことが原因と推察された。

謝辞

（独）港湾空港技術研究所の山路領域長および与那嶺研究官には曝露試験場を提供していただいたばかりでなく、計測に際し貴重なご意見・ご指導をいただきました。厚く謝意を表します。

参考文献

- 1)（社）日本コンクリート工学協会：コンクリートの診断技術'10，基礎編，pp.166-167，2010.10
- 2)山室俊介，森川英典，塩害劣化したRC部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.747-752，2008
- 3)山元淳一，堀口賢一，丸屋剛，塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時の腐食量の評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1139-1144，2011
- 4)小林孝一，宮川豊章，分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究，土木学会論文集，No.669，V-50，pp.173-186，2001.2
- 5)竹田均，堀口賢一，丸屋剛，塩害による鉄筋腐食に及ぼす材料と配合を要因としたコンクリートの種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1015-1020，2009