

論文 表面含浸材の塗布が腐食鉄筋の分極抵抗値に与える影響

深見 桜*1・樋原 弘貴*2・添田 政司*3・庄野 克哉*1

要旨: 表面含浸工法を適用したコンクリートに対し、精度よく分極抵抗によって鉄筋の腐食状況の調査を行うため、含浸材の測定結果に与える影響を明らかにする必要がある。そこで本研究は、含浸材の塗布が腐食鉄筋の分極抵抗値に与える影響について検討した。その結果、健全鉄筋や腐食鉄筋においても、塗布したコンクリートの分極抵抗値は実際の腐食環境よりも健全側に評価された。2 周波で測定された分極抵抗比と腐食質量との関係より、分極抵抗比の低下に伴い、腐食質量の増加が確認され、分極抵抗比で腐食質量を評価できることが示唆された。また、暴露供試体においてもその関係性が確認された。

キーワード: 表面含浸材, 分極抵抗, 腐食質量, 腐食面積率

1. はじめに

近年、既設コンクリート構造物の長寿命化対策としての表面含浸工法の利用が進められている。塩害劣化対策としての利用が多いシラン系表面含浸材は、コンクリートに塗布すると、コンクリート表面に撥水層を形成する特徴を有している。この撥水性能により、水分や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を示し、結果として塩害劣化が抑制されることが既往の研究により確認されている¹⁾²⁾。この工法は、表面被覆工法と比べて材料価格が安価であり施工の容易性から今後もコンクリート構造物への適用は増加していくと予想される。

一方で、コンクリート構造物の鉄筋の腐食状況を調査する方法として、分極抵抗法が広く知られている。今後、表面含浸工法を適用したコンクリートに対し、精度よく分極抵抗によって鉄筋の腐食状況の調査を行うためには、含浸材が上記の測定結果に与える影響を明らかにする必要がある。特に、シラン系表面含浸材は、撥水性によって測定前にコンクリート表面を湿潤状態に保つことが難しいことや含浸層が撥水によって乾燥状態になると予想される¹⁾。既往の研究において、含浸材の塗布面と無塗布面から健全鉄筋の違いを検討したところ、分極抵抗は、いずれも非腐食側として計測された²⁾。さらに、分極抵抗値は、含浸深さ、含水層の抵抗値、コンクリートの抵抗値が分かれば、抵抗値の増加分で含浸材の分極抵抗値を除くと、非含浸面からの測定結果に補正することが可能であった。そのため、対極から鉄筋に分散する電流分布の範囲は、含浸材の影響をさほど受けずに、抵抗の増加による電流量が減少していると予想された。この点については、より詳細に検討する必要がある。また既往の研究では、腐食なしの健全鉄筋での検討であり、腐食鉄筋に対しては、含浸材が測定結果に与える影響についての検討を行っていない。

そこで本研究は、含浸材の塗布の有無にかかわらず電流分布が同一であると仮定し、含浸材の塗布が腐食鉄筋

の分極抵抗値に与える影響要因を明らかにすることを目的とした。実験内容は、内在塩化物イオンを含む供試体を作製し、腐食がある程度進行したところで、含浸材の塗布を行い、対極から鉄筋に流れる電流分布を同一として、塗布前後の分極抵抗値の違いを検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料とその物性を示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(略号:N)を使用した。また、細骨材は、福岡県玄界灘産海砂(略号:S)を使用した。

表-2 には、実験で作製したモルタル配合を示す。水セメント比は、40%、48%、55%の3水準とした。また、鉄筋の腐食を促進する供試体として 0, 2.5, 5, 10kg/m³ の NaCl をあらかじめ添加して作製した。供試体の脱型後は、温度 20℃の環境下で水分を含んだシートで覆い、水分が蒸発しないように包装して湿布養生を 28 日間行った。

2.2 供試体概要および表面含浸材性状

表-3 は、試験に用いたモルタルの水準を示す。供試体は1水準につき3体作製した。供試体概要を図-1に示す。供試体は、100×90×50mm で作製し、試験面からか

表-1 使用材料及び性質

使用材料	種類・性質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g
細骨材	福岡県玄界灘産 海砂(S) 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 1.40%

表-2 モルタル配合表

配合記号	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			s/c
		W	C	S	
N40	40	213	532	1596	3
N48	48	245	510	1530	
N55	55	271	493	1478	

*1 福岡大学大学院 工学研究科 資源循環・環境工学専攻 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 福岡大学大学院 工学研究科 資源循環・環境工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 試験に用いたモルタルの水準

W/C (%)	塩化物イオン含有量(kg/m ³)
40	0
	5
48	0
	2.5
	5
55	10
	0
	5

ぶり 20mm の位置に φ10×50mm の丸鋼鉄筋と、それに 25mm の間隔をあけて φ10×50mm ステンレス棒を並列して埋設した。なお、鉄筋およびステンレス棒の片側端部は、ネジ穴をあけステンレス製ビスを取り付けている。養生後は、試験面およびその背面を除く全ての面をアルミテープで被覆した。その後は、腐食を促進させることを目的として、3%濃度の NaCl 水溶液が溜めてあるバット内にかぶり位置まで浸漬する工程と温度 20℃湿度 60%での乾燥工程を 14 日間ごとに繰り返し、このサイクルを 5, 10, 12 サイクル行った。サイクル終了後は、高周波式水分計で表面水率 6%以下になるまで乾燥させて、図-2 に示す方法で分極抵抗の測定を行った。電流分布および電流量を同一とするため、並列したステンレス棒を測定時に接続し、鉄筋全体に均一な電流分布が流れるようにした。測定終了後は、表-4 に示すシラン系表面含浸材 2 種類を用いて製品規定に準じ、試験面に付着した汚れをエアークンプレッサーで除去後に、刷毛で塗布を行った。その後、2 日間静置し、撥水効果を確認した後に、塗布前と同様に図-2 に示す方法で分極抵抗の測定を行った。

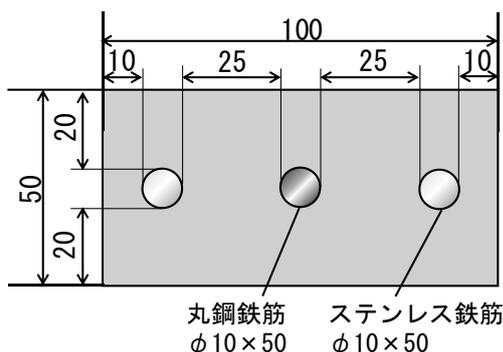
2.3 試験方法

(1) 分極抵抗

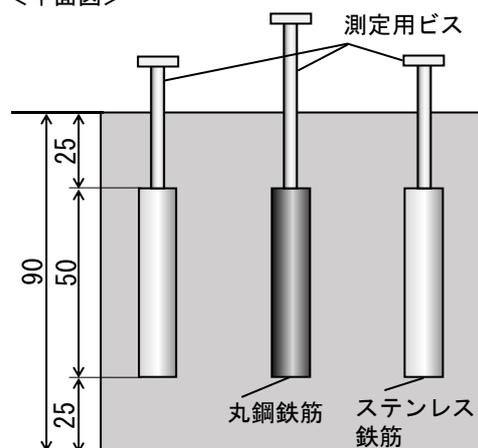
分極抵抗は、二周波数の矩形波交流を用い、測定周波数は、コンクリートの分極抵抗を高周波数 400Hz で測定し、コンクリートと鉄筋の分極抵抗は、低周波数 0.25(4s) ~ 0.01(100s)Hz と変化させて行った。高周波数の測定では、鉄筋と対極の分極抵抗成分を含まないコンクリート抵抗のみが計測される。低周波数の測定では、測定値にコンクリート抵抗成分に加えて、鉄筋の分極抵抗成分も含まれるようになるため、高周波数のコンクリート成分を引いた値を鉄筋の分極抵抗値として算出している。また、分極抵抗は Cole-Cole プロットから求めるものである。この方法は正確ではあるが測定時間が長時間を要することもあり現場での適用が難しいため、本研究では、簡易的な二周波矩形波の測定方法で測定を行い、分極抵抗値は各周波数における測定値(インピーダンス)×鉄筋表面積として算出³⁾した。

(2) 含浸材塗布後の撥水状況

<断面図>



<平面図>



単位: mm

図-1 供試体概要

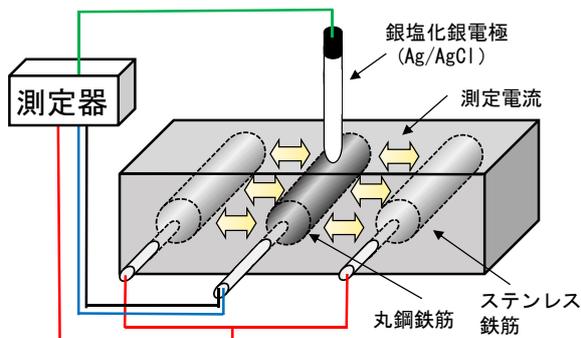


図-2 分極抵抗測定図

表-4 表面含浸材の性状

性状	含浸材	シラン系A	シラン系B
		成分	アルキルアルコキシシラン
性状	種類	-	無溶剤系
	有効成分量(%)	98~100	90%以上
	外観	無色透明液体	半透明ジェル
	粘度(mPa·s)	0.95	-
施工	塗布量(g/m ²)	250	100
	塗布方法	刷毛	
	塗布時の表面含水率(%)	8以下	6以下

撥水性の確認方法は、水掛試験による外観観察が一般的であるが、この方法では、定量的な評価が難しかったため、撥水角によって撥水性能の違いを評価した。まず、塗布面にピペットで 0.3ml の水を一滴垂らし、マイクロスコープにより水滴を撮影した。その後、接地角度を画像処理により撥水角 θ を測定した。図-3 に撥水角の評価指標を示す。測定結果は、この試験を 5 回繰り返して平均値とした。

(3) 含浸深さ

含浸深さ試験は、JSCE-K 571「表面含浸材の試験方法(案) 6.2 含浸深さ試験」に準拠して行った。鉄筋の腐食状況を調査する際に試験体の含浸面を 2 分割になるように割裂した。その後、割裂面の撥水をしている部分の面を 1 分間水に浸漬して取り出し、割裂した面の撥水している部分の厚さを含浸深さとして測定した。含浸深さの測定位置は、片面 5 箇所とし、対面する割裂面で合計 10 箇所の含浸深さをノギスで 0.1mm の単位で測定し、その平均値を算出した。

(4) 鉄筋腐食質量

解体後に取り出した鉄筋は、デジタルカメラを用いて外観観察を行った。また、腐食面積率は、鉄筋にセロハンテープを巻きつけて、腐食箇所を転写した後に画像処理により算出した。腐食質量は、JCI-SCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して、濃度 10% のクエン酸アンモニウム水溶液に 2 日間浸漬した後に、腐食生成物を除去した。その後、腐食前と腐食後の重量差から腐食質量を算出した。

2.4 暴露条件

暴露供試体は 150×100×100mm の角柱モルタルであり、かぶり 30mm の位置に $\phi 10 \times 90$ mm の鉄筋、分極抵抗を測定する際の対極としてステンレス鉄筋 $\phi 10 \times 90$ mm を埋設した。供試体に塗布した含浸材とその塗布方法は 2.2 に示したものと同様である。暴露条件は、一般大気中と干満滞で試験を行った。一般大気中は、海から約 2.6km 離れた橋梁の桁下、干満滞は、汀線部に供試体を設置した。一般大気中および干満滞は、本実験と並行して、1 年間暴露してあり⁴⁾、いずれの環境においても(1)分極抵抗の同様の方法で含浸材塗布面と非含浸面の分極抵抗の測定を曝露 1 年目で行った。暴露試験と室内実験の供試体を比較して分極抵抗比における関係性の検討を行った。

3. 結果及び考察

表-5 には、測定した含浸材の撥水角と含浸深さ試験の結果を合わせて示す。シラン A の撥水角は 99.5°、シラン B の撥水角は 141° と、シラン A よりも B の方が高い傾向にあった。含浸深さは、シラン A では 2.33mm、シラン B では 1.42mm であった。

図-4 は、一例として初期塩化物イオン量 0kg/m³ の供試体における W/C=55% の健全鉄筋の分極抵抗の測定結果を示す。分極抵抗は、シラン B の塗布前と塗布後に行い、低周波領域 0.1Hz(10s)~0.01Hz(100s)に変化させて測

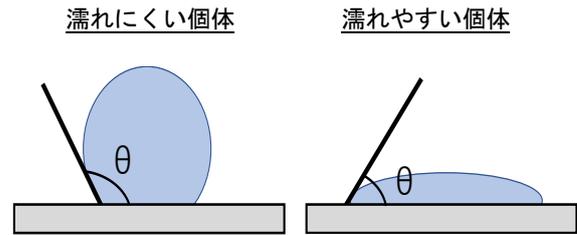


図-3 撥水角の評価

表-5 測定した含浸材の性能 (W/C=48%)

含浸材		シランA	シランB
含浸材の性能	撥水角 (°)	99.5	141
	含浸深さ (mm)	2.33	1.42

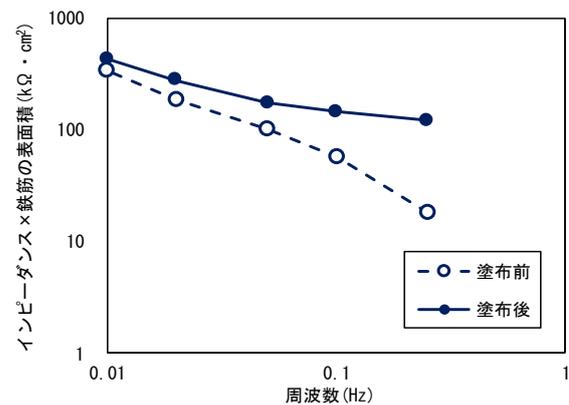


図-4 健全鉄筋における周波数ごとの分極抵抗 (シラン B, W/C=55%)

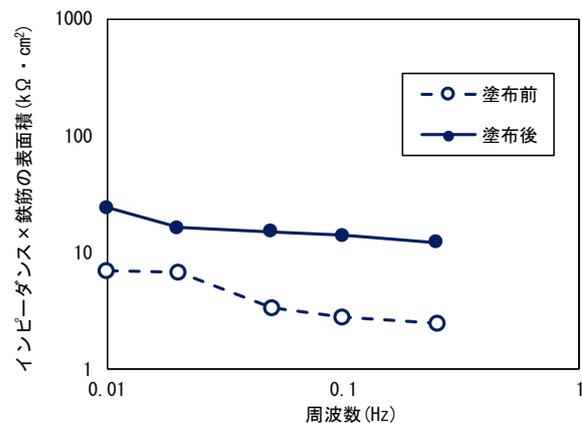


図-5 腐食鉄筋における周波数ごとの分極抵抗 (シラン B, W/C=48%)

定を行っている。また、塗布前後の分極抵抗値の乖離は、周波数が高くなると大きくなる傾向を示した。

図-5 には、一例として、初期塩化物イオン量 5kg/m³

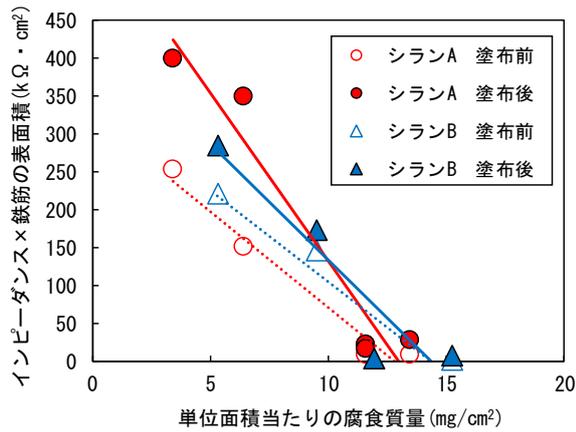


図-6 分極抵抗と腐食質量の関係
(W/C=48%, 0.01Hz)

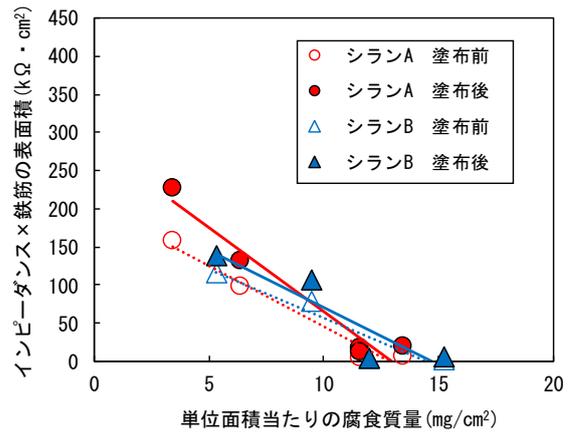


図-7 分極抵抗と腐食質量の関係
(W/C=48%, 0.02Hz)

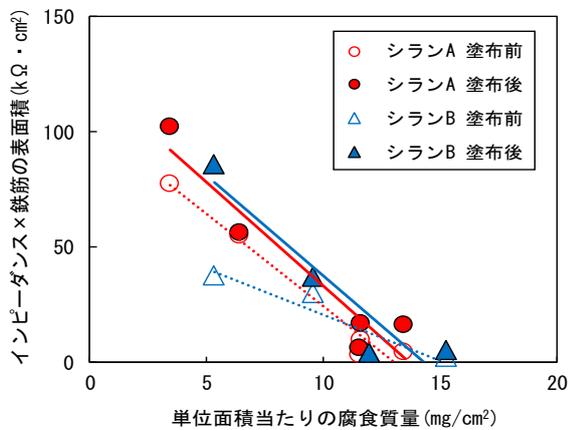


図-8 分極抵抗と腐食質量の関係
(W/C=48%, 0.05Hz)

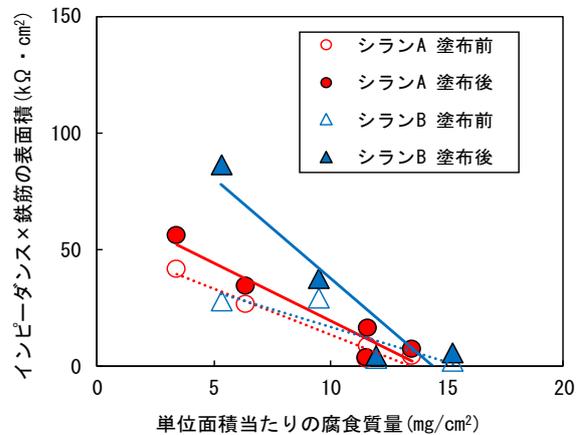


図-9 分極抵抗と腐食質量の関係
(W/C=48%, 0.1Hz)

の供試体における、解体後に明らかな鉄筋腐食が確認された W/C=48%, シラン B の塗布前後の分極抵抗値を示す。鉄筋が腐食していることで分極抵抗値は、図-4 に示した健全鉄筋に比べて低下する結果を示した。特に、低周波帯の分極抵抗値は、大きく減少しており、周波数帯ごとの差も小さくなっている。また、腐食鉄筋に対しても同様に、含浸材の塗布後の分極抵抗値は、塗布前に比べて、いずれの周波数帯においても高いことが分かる。以上のことから、腐食鉄筋においても健全鉄筋と同様に含浸材が塗布されていると、実際の腐食環境よりも健全側に評価されることが確認された。

図-6 には、一例として W/C=48%, 初期塩化物イオン量 2.5, 5, 10kg/m³ の明らかに腐食が確認された供試体を低周波 0.01Hz で測定を行った分極抵抗と腐食質量の関係を示す。なお、既往の研究と同様に、分極抵抗と腐食の関係性は、腐食面積よりも腐食質量との相関が強かったことから⁵⁾、腐食質量との関係性について評価を行った。分極抵抗値は、いずれの供試体も腐食質量が増加するに従って低下する結果を示した。含浸材の影響は、腐食質量が小さいものほど大きく、塗布前に比べるといずれの材料においても大きくなっている。ただし、単位面積

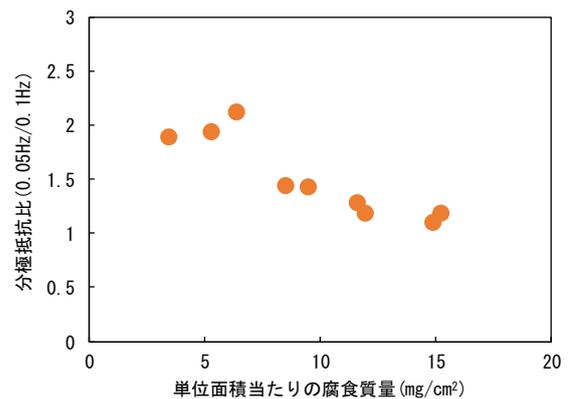


図-10 分極抵抗比と腐食質量の関係
(0.05Hz/0.1Hz)

あたりの腐食質量が 11mg/cm² を超えると含浸材の有無に関わらず、分極抵抗値の差は確認されなかった。

図-7 から図-9 には、W/C=48%において、初期塩化物イオン量 2.5, 5, 10kg/m³ の明らかに腐食が確認された供試体を低周波領域 0.02Hz, 0.05Hz, 0.1Hz で測定を行った分極抵抗と腐食質量の関係を示す。いずれの周波数においても分極抵抗値は、含浸材種類に関わらず、分

極抵抗値の低下に従い腐食質量が大きくなっている。また、含浸材塗布後の分極抵抗値は、塗布前に比べると高くなっており、含浸材の種類による違いは今回の結果からでは明らかにできなかった。また、図-6の結果と同様に単位面積当たりの腐食質量が $11\text{mg}/\text{cm}^2$ を超えると、いずれの測定周波数においても含浸材有無による分極抵抗値の違いは確認されなかった。

以上のことから、腐食鉄筋においても含浸材を塗布すると、ある一定の腐食質量に達するまで、分極抵抗値は腐食が小さい側に評価されることが分かった。よって、電流分布を同一とした場合でも差が見られたことから、鉄筋の分極に伴う自然電位の変動の違いが影響していると推察できた。

そこで、別の評価軸を設ける必要があることから、測定周波数が近い異なる周波数帯で測定された2点の分極抵抗比を算出し、腐食質量との関係性について検討を行った。既往の研究より、 0.01Hz や 0.02Hz といった低周波領域で測定された分極抵抗は、それよりも高い周波数領域で測定されたものよりも対極とコンクリートの接触抵抗の影響が小さいことが分かっている²⁾。そこで、周波数帯が近いと分極抵抗に与える種々のコンクリート内部の影響要因も近いと考えられたことから、近い周波数帯の分極抵抗比で含浸前と含浸後の違いについて評価を行った。また、併せて 0.05Hz と 0.1Hz の分極抵抗比についても検討を行った。

図-10には、含浸材を塗布する前に 0.05Hz と 0.1Hz でそれぞれ測定された分極抵抗比と腐食質量の関係を示す。この結果、分極抵抗比は、腐食質量が増加するに従って低下していた。図-11は、含浸材を塗布する前の測定周波数 0.01Hz および 0.02Hz との分極抵抗比と腐食質量の関係を示す。この結果も同様に分極抵抗比は、腐食質量が増加するに従って低下する結果を示した。また、腐食質量の増加に伴い分極抵抗比が小さくなる理由としては、図-4 および図-5 に示したように低周波になるに従い、腐食に伴う分極抵抗の低下が大きいことが考えられる。また、いずれの分極抵抗比においても、1周波の分極抵抗の評価では、図-6から図-9の結果より単位面積当たりの腐食質量が $11\text{mg}/\text{cm}^2$ を超えると分極抵抗に違いは見られなかったが、異なる2周波で測定された分極抵抗値を分極抵抗比にすることでより大きな腐食質量まで評価できる可能性が示唆された。

図-12、図-13は、塗布前と塗布後における周波数 0.05Hz と 0.1Hz の分極抵抗比の関係性を含浸材種類ごとに示す。なお、凡例に示す干満滞および一般大気中は、本実験と並行して、含浸材を塗布し1年間暴露した供試体であり⁴⁾、含浸材塗布面と非塗布面から測定された結果も併せて示している。この結果、塗布前後の分極抵抗の関係性は、概ね相関が得られているが、含浸材を塗布した一部の供試体では、分極抵抗比が大きいものも見られた。

次に、図-14、図-15には、塗布前後における測定周

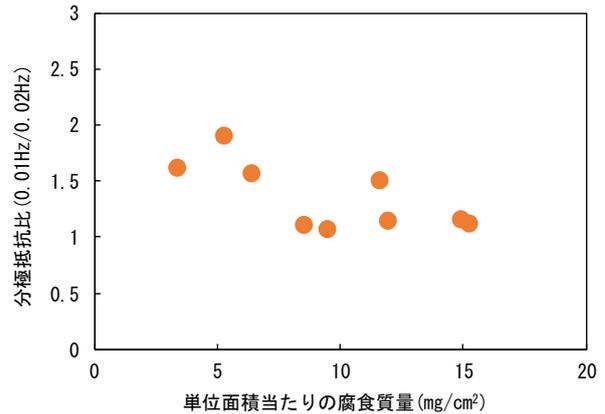


図-11 分極抵抗と腐食質量の関係 (0.01Hz/0.02Hz)

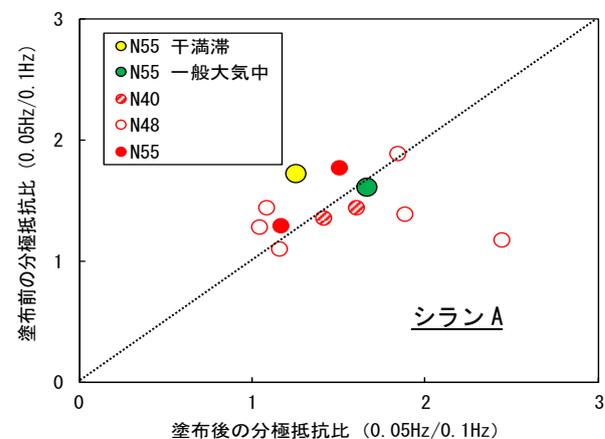


図-12 塗布前と塗布後の分極抵抗比の関係 (シラン A, 0.05Hz/0.1Hz)

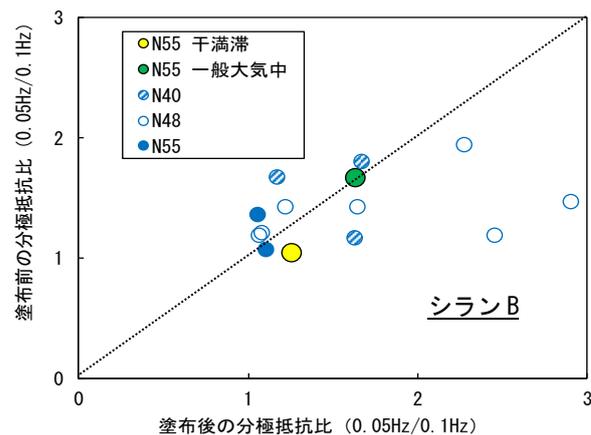


図-13 塗布前と塗布後の分極抵抗比の関係 (シラン B, 0.05Hz/0.1Hz)

波数 0.01Hz と 0.02Hz の分極抵抗比の関係を示す。この結果も同様に分極抵抗比は、塗布前後においてある程度の相関が得られていた。また、 0.05Hz と 0.1Hz の分極抵抗比に比べると、バラツキも小さくなっており、暴露供試体においても関係性が得られることを確認できた。

以上のことから、含浸材が塗布された構造物において、

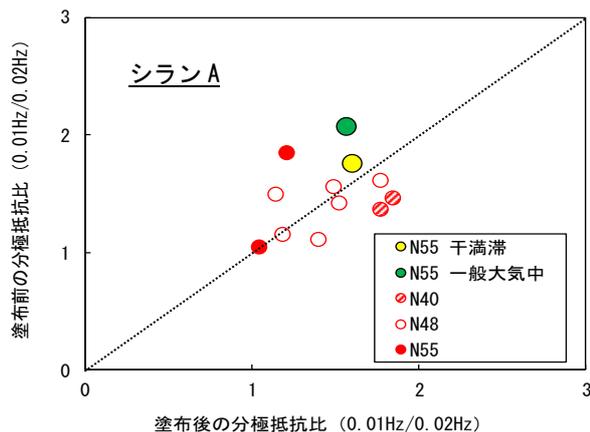


図-14 塗布前と塗布後の分極抵抗比の関係
(シラン A, 0.01Hz/0.02Hz)

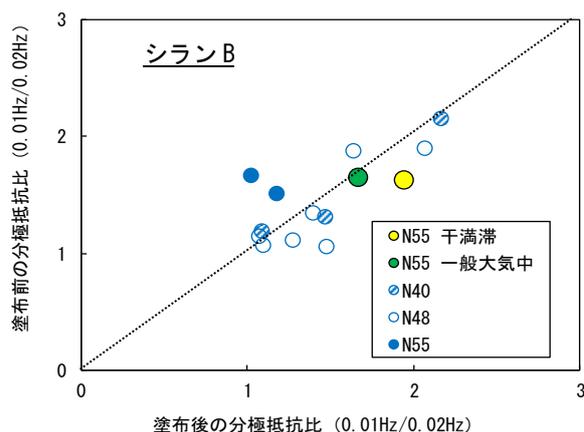


図-15 塗布前と塗布後の分極抵抗比の関係
(シラン B, 0.01Hz/0.02Hz)

分極抵抗から腐食環境を評価する場合には、分極抵抗比という新たな評価軸を設けることで腐食鉄筋に対しても評価できる可能性があると考えられた。

4. まとめ

本研究では、表面含浸材の塗布が腐食鉄筋における分極抵抗の測定結果に与える影響について検討を行ったものである。以下に、本研究で得られた知見を記す。

- (1) 表面含浸工法を適用したコンクリート構造物の鉄筋の腐食状況を分極抵抗によって評価する場合には、健全鉄筋や腐食鉄筋においても、分極抵抗値は実際の腐食環境よりも健全側に評価されることが分かった。
- (2) 表面含浸材の塗布の有無に関わらず、本研究の範囲では、1周波の分極抵抗のいずれの測定周波数においても、単位面積当たりの腐食質量が $11\text{mg}/\text{cm}^2$ に達するまで、分極抵抗値は非腐食側に評価されることが分かった。
- (3) 測定周波数が近い異なる2周波で測定された分極抵抗比と腐食質量との関係により、含浸材が塗布されたコンクリートに対しても腐食状態を評価できる可能性がある。
- (4) 干満滞および一般大気中環境で表面含浸材を塗布した暴露供試体においても、分極抵抗比の関係性を得ることができた。

謝辞

なお本研究は、JSPS 科研費 JP18K04315 に助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 横田優, 佐々木孝彦, 飯島亮, 松嶋学: 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 2) 大塚柚人, 樋原弘貴ら: 表面含浸材工法の適用が電気化学的手法による鉄筋の状態評価に与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第15巻 1032, 2019, 10
- 3) 吉田秀典, 川上純, 荒木志帆, 横田優: 電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究, 土木学会論文集 A2, Vol. 69, No. 2, I_677-I_687, 2013
- 4) Fukami S, Hazebara H and Katpady, D.N.: Influence of Surface Impregnation Application on Corrosion Judgement by Electrochemical Method, The 3rd, ACF Symposium, Oct.2019
- 5) 大塚柚人, 樋原弘貴ら: 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019, 9