# 表面含浸材が施工された構造物における自然電位による

# 鉄筋腐食性評価に関する研究

### **櫨原 弘貴**<sup>1</sup>

## 福岡大学工学部社会デザイン工学科

本研究は、シラン系表面含浸材を対象に、含浸材の塗布が自然電位の測定結果に与える影響について 検討を行った。撥水性能が付与されるため、自然電位が貴側に測定されることや撥水性能の低下に伴 い含浸材が自然電位に与える影響が小さくなることを確認した。撥水性能が保持されている場合には、 腐食判定電位は、実電位よりも概ね90mV 貴側に存在することが分かった。

## 1. はじめに

塩害環境下におけるコンクリート構造物が早 期に劣化が顕在化する事例が散見されている<sup>1)</sup>。 そのため、コンクリート内部の劣化因子の侵入 状況や鉄筋腐食状況を適切に評価し、大規模補 修に繋がる以前の予防保全段階で何らかの対策 を施すことが望ましい。近年では、予防保全対 策の一つとして、安価で施工が容易な表面含浸 工法の適用が増加してきている<sup>2)3)4)</sup>。

一方で、内部鉄筋の腐食状態を評価する方法 として、非破壊検査の一つである自然電位法が 広く用いられてきている。しかし、表面含浸工 法が適用されたコンクリート構造物に対して、 自然電位法を適用した際には、撥水性能により コンクリート表層を湿潤状態にできない問題や、 含浸部の含水率の低下によるコンクリート抵抗 値の増加が自然電位の測定結果に影響を及ぼす 可能性がある。予防保全対策の実施により、今 後も表面含浸工法が適用された構造物が年々増 加していくと予想される中で、これらの構造物 に対しても適切な維持管理が求められる。

そこで本研究は、シラン系表面含浸材の塗布 が自然電位の測定結果に与える影響を明らかに することを目的とした。具体的には、表面含浸 材を塗布した面と非塗布面を設けたコンクリー ト供試体を作製し、塩化物イオン浸透環境下で 自然電位を含浸材の塗布面と非塗布面から経環 的に測定して、その違いについて検討を行った。 さらに、シラン系表面含浸材の場合には、紫外 線により長期的に撥水性能が低下していくと言 われていることから<sup>5)</sup>、水を滴下した際の撥水 角と塗布面および非塗布面から測定された自然 電位差の関係性についても検討し、撥水性能の 低下が測定結果に与える影響についても併せて 評価を行った。

## 2. 実験概要

供試体は,普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>),細骨材に福岡県玄海灘産の海砂(表 乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>)を用いて,水セメント比 55% で作製した。表-1 には,作製した供試体の配 合を示す。図-1 には,供試体の概要を示す。 形状は 150×100×100mm の角柱モルタルとした。 かぶり深さ 30,50mm の位置に $\varphi$ 10×90mm の鉄 筋を埋設し, $\varphi$ 10×90mm のステンレス鉄筋を鉄 筋間に並列して埋設した。ステンレスを埋設し た理由は,本論では記述しないが,埋設鉄筋の 分極抵抗を測定するための対極として用いるた めである。

セメント種類	w/c	s/c
OPC	0.55	3

表1 実験に用いた供試体の配合



	含浸材	シラン系 A	シラン系 B	けい酸塩系
性状	成分	アルキルアルコキシシラン	シランおよびシロキサン	けい酸塩ナトリウム
	種類	-	無溶剤系	反応型
	有効成分量 (%)	98~100	90以上	-
	外観	無色透明	半透明ジェル	無色透明液体
	粘度 (mPa・s)	0.95	-	-
施工	塗布量 (g/m²)	250	100	250
	塗布方法	刷毛		
	塗布時の	<b>2</b> 以下	6以下	$6{\sim}8$
	表面含水率 (%)	0以下		
性能	撥水角(°)	143.5	148	-
	含浸深さ(mm)	4.54	1.84	-
	吸水抑制率 (%)	56	15	-

表2 表面含浸材の性状

また,予め鉄筋直上には,非塗布面から自然電 位を測定できる様に図-1および写真-1に示 す様に塩ビ管を埋め込んでいる。28日間の湿布 養生後は,含浸材塗布面および塩ビ管埋設位置 を除く全ての箇所をエポキシ樹脂で被覆した。 表-2には,実験で用いた含浸材種類および性 状を示す。実験には,シラン系表面含浸材2種 類を用いた。



非塗布面(塩ビ管位置)



塗布面(試験面) 写真1 供試体および測定方法

塗布方法は、図-1に示す含浸材塗布面に28 日間の湿布養生終了後に 10 日間かけて含水率 の調整と製品規定に準拠してハケで塗布を行っ た。含浸材塗布後の試験環境は、試験日数 450 日目までは、2週間ごとに乾燥環境(20℃、相対 湿度 60%)・湿潤環境(20℃,相対湿度 90%)を繰 り返し、それ以降は(20℃、相対湿度 90%)の環 境下に静置した。また,試験開始71日目からは, 腐食発生時の自然電位の違いを評価するために 塩ビ管内に 3%NaCl 水溶液を常時溜水した。そ の後も同様に塗布面(試験面)および非塗布面 (塩ビ管位置)から定期的に自然電位の測定を行 った。また撥水性能を評価するために所定の試 験体において定期的に撥水角の測定を行った。 塩ビ管位置での自然電位が-350mV を卑下した 供試体においては,解体をして実際の鉄筋腐食 状況を目視で確認した。





撥水性が低い

撥水性が高い

図-2 撥水角の算出方法

## 3. 測定項目および方法

# (1) 自然電位

自然電位は、供試体の腐食の進行状況を確認 するために経時的に測定を行った。自然電位の 測定は、塗布面(試験面)のかぶり 30,50mm の 鉄筋にそれぞれ対応する非塗布面(塩ビ管位 置)で実施した。測定結果についてもかぶり深さ ごとに示す。無塗布供試体の測定方法は、デー タロガーにより1(回/日)の試験面および塩ビ管 位置から銀塩化銀電極(Ag/AgCl)にて測定を行 った。一方の表面含浸材を塗布した供試体は、 マルチメータにより手動で定期的に測定を行っ た。なお、自然電位測定前には、吸水したキム ワイプで測定面を30分湿潤させた。自然電位の 測定値は、以下の式(1)を用いて CSE の電位変換 を行い、以降の試験結果を示している 6。

# $E^{n_{t}} cse = E^{n_{t}} sse^{-120.1 \cdot 2.00} \cdot (t \cdot 25)$ (1)

・*E<sup>Fe</sup>t, CSE*: CSE 換算・温度補正値

*E<sup>Fe</sup>t,SSE*:温度 *t* [℃] における銀-塩化銀電極 測定値

*• t*: 温度 [℃]

(2) 撥水角

撥水角  $\theta$  は, 試験面にマイクロピペットで 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, 接地角度を画像処理により算 出した。試験結果は, 左右の接地角度の平均値 とした。撥水角  $\theta$  の算出は, **図**-2 に示す通り である。

#### (3) 腐食状況の確認

塩ビ管位置の自然電位が-350mVよりも卑に なった供試体は,解体して鉄筋を取出して,目 視により腐食の有無の確認を行った。

#### 4. 結果および考察

図-3,4には、かぶり30mm、50mm位置に おける鉄筋の自然電位のモニタリング結果を示 す。かぶり30mm位置での無塗布供試体の自然 電位は、試験面と塩ビ管位置でそれぞれ測定さ れた自然電位の間に差は確認されなかった。ま た、測定開始71日目(材齢107日)から塩ビ管内 にNaCl溶液を溜水したが、塩ビ管位置での自然 電位は、その前後でほとんど変動しておらず、 長期的に安定していることから、NaClの溜水が 自然電位に与える影響は極めて小さいと言える。 また、両者の自然電位は、測定開始200日目付 近から卑化を示しており、その傾向にも違いが 見られなかった。

自然電位は,-350mVよりも卑化していること から90%以上の確率で腐食が発生していると考 えられる。また,かぶり50mm位置における鉄 筋の自然電位は,測定開始50日目までに測定位 置で差が確認されているが,それ以降では,か ぶり30mmと同様に自然電位に差を見られなか った。以上のことから,測定位置に関らず,適切に自然電位を評価できていることが分かる。 図-5には、かぶり30mm鉄筋におけるシラン 系Aを塗布したNo.1の供試体の自然電位のモ ニタリング結果を示す。この結果,試験開始初 期から塗布面から測定された自然電位は、非塗 布面で測定された値よりも貴となっている。ま た、両者の自然電位の差は、測定期間によって 多少の大小は確認されるが、概ね50mV~ 100mV程度の違いになっている。





図5 シランA 自然電位の経時変化(No.1)

この両者の違いは、一般的に自然電位を測定す る際に、測定面を湿潤状態になるように素地調 整を行うが、含浸材が塗布されている場合には、 撥水効果の影響で湿潤状態に調整することが難 しいことが原因であると考えられる。そのため、 電極と供試体表面において接触抵抗が増加した ことや、含浸層が乾燥状態となっていたことで、 その範囲の抵抗値が増加したことが影響してい ると推察される。ただし、600 日以降に測定さ れた自然電位には、両者の違いは確認されなか った。この点については、後述する。

図-6 には、腐食が発生していると推定され たかぶり 30mm 鉄筋におけるシラン系 A を塗布 した No.3 の供試体の自然電位のモニタリング 結果を示す。非塗布面から測定された自然電位 は、測定開始 330 日目以降に-350mV よりも卑化 し、-367mV であるのに対し、塗布面から測定さ れた自然電位では、-350mV よりも貴な-284mV の値を示している。-350mV よりも貴な-284mV の値を示している。-350mV よりも卑な値を示し た供試体は、同水準において現時点で1 体のみ であるが、腐食が 90%以上の高い確率で発生し ていると判断される場合においても含浸材の塗 布の影響によって、非腐食として判定される可 能性が示唆された。また、**写真-2** には、解体 後の腐食状況を示しているが、鉄筋端部に腐食 発生を確認できている。

次に, 図-7には, 一例としてシラン系 B を 塗布した供試体No.1におけるかぶり30mm位置 鉄筋の自然電位のモニタリング結果を示す。い ずれの供試体においても含浸面から測定された 自然電位は、非塗布面からの測定値よりも貴な 値を示している。この結果は、シラン系Aと同 様であったが、自然電位の差は、シラン系Aよ りも比較的小さくなっており、含浸材種類によ って自然電位に与える影響が異なることが分か った。また、両者の電位差の違いは、シラン系 A を塗布した場合と比べて多少時期が異なるが, 500 日目以降から同様に小さくなっている。 シラン系において長期的に自然電位差が小さく なる現象について考察を行うために、撥水角と 自然電位差の関係性について検討を行った結果 を図-8 に示す。なお、自然電位差は、撥水角 を測定した際に生じていた塗布面と非塗布面の 自然電位の結果を用いている。撥水角と自然電 位差の関係は、いずれのシラン系においても撥 水角が低下するに従って自然電位の差も小さく なっているのが分かる。無塗布と同程度の電位 差になる撥水角を推定するために近似曲線を用 いた。その結果、シラン系 A では 60~70°、シ

ラン系 B で90~100°となった。長期的に表層の 撥水性能が低下している場合には,自然電位差 が縮小するため,従来の自然電位法を適用する ことが可能と考えられたが,その閾値は,含浸 材種類によって異なっている。そこで,**表-2** に示した含浸深さに着目すると,含浸深さは, シラン系 A の方がシラン系 B よりも大きいこと が分かる。そのため,撥水角の大小により自然 電位への影響の有無を判断するのは,現時点で は難しく,含浸深さの影響も考慮する必要があ ると考えられる。



自然電位のモニタリングの結果から,撥水性 能が保持している日数で腐食判定の閾値の推定 を行った。その結果を下記する。

**図-9**には、シラン系 A, B のかぶり 30mm 鉄筋における塗布面および非塗布面から測定さ れた自然電位の関係を示す。





また、図-10は、同様にかぶり50mm鉄筋に おける自然電位の関係を示す。シラン系を塗布 した場合には、塗布面から測定された自然電位 は、いずれも非塗布面よりも貴な値を示してい る。また、非塗布面の自然電位が-350mVよりも 卑になっているにも関わらず、塗布面では未だ に腐食判定の閾値に達していないのが分かる。 この傾向は、かぶり深さに関らず同様であった。 次に、シラン系において近似直線により非塗



表3 含浸材塗布供試体の腐食発生電位

電位 (mV vs CSE)	シランA	シラン B
かぶり 30mm	-277	-251
かぶり 50mm	-252	-258
平均	-265	-255
-350mV との差	85	95

布面の自然電位-350mV との交点における自然 電位を求めたところ, 概ね-250mV 程度であった。 その結果を表-3 にまとめて示す. シラン系 A における自然電位には, かぶり 30mm で-268mV, かぶり 50mm で-252mV, シラン系 B では, かぶ り 30mm では-242mV, かぶり 50mm では-263mV が塗布面で測定される際の腐食判定閾値の推定 値である。

現時点では、表層の撥水性能が保持されてい る範囲での推定値であり、今後は、自然電位に 及ぼす含浸材の性能特性と経時的な性能低下の 関係性をより詳細に検討していく予定である。

#### 5. まとめ

本研究は、シラン系表面含浸材を塗布したコン クリート構造において自然電位の測定を想定し て、含浸材の塗布が自然電位の測定結果に及ぼ す影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) シラン系表面含浸材を塗布することによっ て、自然電位は、貴側に測定される。
- (2) 表層の撥水性能の低下に従って、シラン系 表面含浸材が自然電位に与える影響は小さ くなるが、その影響程度は含浸材種類によ り異なる。
- (3) シラン系表面含浸材の撥水性能が保持され てる場合には、内部鉄筋が腐食していても 腐食判定基準の-350mV よりも貴な値とし て判定される。
- (4) 撥水性能が保持されている範囲で、シラン 系含浸材の塗布面から自然電位を測定する 場合は、概ね-90mV 程度差し引く必要があ ると考えられた。

謝辞:本研究を進めるにあたり,福岡大学大学 院資源循環環境工学専攻修士1年庄野克哉氏に は多大なご協力を頂きました。また,九州建設 技術管理公開の建設技術研究開発助成を受けた ものである。ここに感謝の意を記します。

#### 参考文献

- 大塚柚人,櫨原弘貴,玉井宏樹,小池賢太郎:表面含浸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,アップグレード論文報告集第19巻,p361-p366,2019.10
- 遠藤裕丈,田口史雄:シラン系表面含浸材 の含浸性状とコンクリートの品質との関係, 論文報告集第63号,F-2,2007
- 3) 土木学会:表面保護工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー119号,2005
- 4) 土木学会:けい酸塩系表面含浸工法の設計 施工指針(案),コンクリートライブラリー 137 号,2012
- 古谷英彦,細田暁,鈴木雄大,松田芳範: シラン系表面含浸材の紫外線劣化の吸水試験による評価,コンクリート工学年次論文 集,Vol31,No.1, p1945-1950, 2009
- 6) 篠田吉央,望月紀保:鉄筋自然電位の測定 温度に伴う照合電極間の電位換算について, 土木学会第66回年次学術講演会,VI-224, p447-448,2011