

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04315

研究課題名(和文) 表面含浸工法を適用した構造物における電気化学的手法を用いた腐食診断法の開発

研究課題名(英文) Development of corrosion diagnostic method using electrochemical method in structures to which surface penetration method is applied

研究代表者

樫原 弘貴 (HAZEHARA, HIROTAKA)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：70580182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：表面含浸工法が適用されたコンクリート構造物における電気化学的手法による腐食診断技術を構築することを目的として、自然電位法および分極抵抗法の適用法について検討を行った。含浸材塗布面から自然電位や分極抵抗を測定した際には、非腐食側に測定されることを確認し、自然電位法においては、含浸材の初期性能が保持されている場合の腐食判定の閾値を示すことができた。また、含浸材の性能低下と測定される自然電位には、相関性がありコンクリート表面の撥水角を指標とした補正が可能であることが分かった。一方の、分極抵抗では、異なる周波数で測定された分極抵抗値の比によって腐食速度を表現できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物の老朽化に伴い、如何に維持管理していくかが重要な課題となっている。近年、長寿命化対策として、表面含浸工法の適用が増加しており、今後も増加していくと予想される。表面含浸工法が適用された維持管理法については、従来の手法をそのまま適用することが難しく、適切に診断できない可能性がある。本研究で得られた成果により、表面含浸工法が適用されたコンクリートにおいても適切に自然電位や分極抵抗法を用いた劣化診断が適用できる知見を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of constructing a corrosion diagnostic technique by an electrochemical method in a concrete structure to which the surface penetration method is applied, the application methods of the natural potential method and the polarization resistance method were examined. When the natural potential and polarization resistance are measured from the surface applied with the impregnating material, it is confirmed that the measurement is performed on the non-corrosive side, and it was able to show the threshold. It was also found that there is a correlation between the deterioration of the performance of the penetrated material and the measured natural potential, and it is possible to correct using the water repellency angle of the concrete surface as an index. It was found that the corrosion rate can be expressed by the ratio of the measured polarization resistance values.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：表面含浸材 自然電位法 分極抵抗法 撥水角

1. 研究開始当初の背景

長期にわたるコンクリート構造物の健全性を確保するためには、劣化の進行を逐次把握し、大事に至る前に対策を施すことが重要となってきた。近年では、コンクリート構造物の長寿命化を図る目的で、表面含浸工法を適用する事例が2000年代に入って急増してきている。その様な背景の中、2005年4月には、土木学会「表面保護工法設計施工指針(案)」が策定され、2012年4月には「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」が土木学会から策定されている。表面含浸工法を適用する体制が整ったことで、今後も需要は拡大していく傾向にある。

一方で、コンクリート構造物の健全性を確認するために、5年に1度の定期点検が義務付けられるようになり、表面含浸工法が適用された構造物も効率的に維持管理していく必要があるが、詳細点検の際の腐食診断において技術的課題に直面している。具体的には、従来の腐食診断法をそのまま用いると、安全側に測定されてしまうため、従来の規準を当てはまるのが難しい状況にある。そのため、各種表面含浸材の性能や含浸深さを考慮した電気化学的手法による表面含浸工法を施したコンクリート構造物への新たな腐食診断法を構築し、提示することが重要となっている。

2. 研究の目的

表面含浸工法を適用したコンクリート構造物に対しても自然電位法や分極抵抗法の電気化学的手法により内部鉄筋の腐食状況や腐食速度を精度よく測定することで効率的な維持管理が可能となる。そこで本研究の目的は、①含浸深さにおける抵抗値の増加、②測定前にコンクリート表面を湿潤状態にすることが難しいことから電極とコンクリートの接触抵抗、③コンクリート内部の含水率分布、の3者を考慮した補正方法や腐食判定の閾値を提示した上で、腐食診断法や測定法を構築することにある。

3. 研究の方法

供試体は、これまでの検討を基に異形鉄筋とステンレス棒、さらに深さごとの抵抗値を詳細に把握するため、ウィナー法の原理を用いて交流電流から抵抗値を算出するための測定用プローブを埋設したものを作製する。また、含浸材の塗布後の各種環境下でのコンクリート内部の含水率・抵抗値分布の把握を目的とした供試体も別途作製する。表面含浸材は、含浸深さ等の基本物性や付与効果を既に確認しているシラン系表面含浸材およびけい酸塩系表面含浸材ならびに比較用の無塗布供試体を設ける。

測定方法は、既存のマルチメータおよび分極抵抗測定器、LCRメータを使用して、自然電位と分極抵抗、比抵抗の測定を行う。また、埋設した照合電極およびステンレス棒、プローブ電極を介して、同様の測定を行って、含浸材塗布面との測定結果を比較検討した。

4. 研究成果

(1) 表面含浸材の塗布が自然電位に与える影響

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°C, 相対湿度60%)・湿潤環境(20°C, 相対湿度90%)を繰り返し、それ以降は(20°C, 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無塗布面に塩ビ管を設置し、その管内に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うことで両者の違いを検討した。

一例として、図1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。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。近似直線により非塗布面の自然電位-

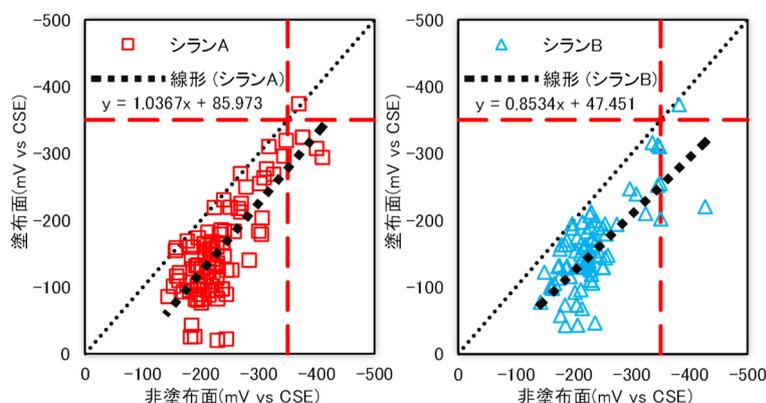


図.1 塗布面と非塗布面における自然電位の違い
(かぶり 30mm)

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。なお、この結果はシラン系表面含浸材の撥水性能が保持されている範囲での推定値である。また、長期的に撥水性能が低下することは知られており、性能低下に伴って測定される自然電位の違いは小さくなると予想されることから、撥水角を指標として、塗布面と非塗布面の自然電位の差の関係を図2に示す。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くのが分かる。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、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 よりも大きいことから、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。

以下には、得られた成果を示している。

- ・シラン系表面含浸材を塗布することによって、自然電位はいずれも貴側に測定される。
- ・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。また、その影響程度は含浸材種類によって異なる。
- ・シラン系表面含浸材の撥水性能が保持されている場合には、内部鉄筋が腐食している場合でも腐食判定基準である-350mV よりも貴な値として判定される。
- ・撥水性能が保持されている場合には、いずれの含浸材においても自然電位を概ね-90mV を差し引くことで、内部鉄筋の自然電位に換算することができる。

(2) 表面含浸材の塗布が自然電位に与える影響

分極抵抗の測定は、含浸材の塗布面に測定用プローブ（対極）および銀塩化銀電極を充てて測定した。一方の非含浸面からの分極抵抗は、無塗布位置に銀塩化銀電極を充てて、埋設されたステンレス鉄筋を対極として測定を行った。測定方法は、交流インピーダンス法で行っており、実構造物の測定でも汎用的に用いられている市販の二周波数の矩形波交流の分極抵抗器を用いた。測定周波数は、高周波数 400Hz、低周波数 0.1Hz とし、材齢 36 日目以降 14 日ごとに測定を行った。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。一方の低周波数の測定では、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抵抗成分を引いた値を鉄筋の分極抵抗値として算出した。また、本来の分極抵抗は、Cole-Cole プロットからコンクリート抵抗成分を引いた値を鉄筋の分極抵抗値として求められるものであるが、本研究では、各周波数における測定値（インピーダンス）×鉄筋表面積とした。材齢 106 日目（測定開始 70 日目）には、各周波数帯での鉄筋状況を詳細に把握するため、一部の供試体で分極抵抗を測定する際の低周波領域の測定範囲を 0.1(10s)~0.01(100s)Hz と変化させて行った。

表面含浸材を塗布した供試体の深さごとの抵抗値を把握するため、打ち込み時に φ2mm の真鍮丸棒を含浸面から 10, 20, 30, 40, 50mm の深さごとに等間隔で 4 本ずつ埋設した。所定の深さごとに埋設された真鍮丸棒間の電流と電圧を LCR メータで測定を行い、電圧を電流で除して深さごとの抵抗値を異なる含水状態でそれぞれ算出した。含浸深さは実測した。

解析モデルの適用は、鉄筋コンクリート供試体のコンクリート表面に電圧を印加し、含浸層の有無、厚さや抵抗値の違いによる電流分散への影響を把握した。コンクリート中の電気化学的挙動の解明については、既往の研究で有限要素法^{7), 8)}や境界要素法⁹⁾を用いた解析が実施されてきているが、本研究では、コンクリートの乾湿に伴う抵抗率の非均一性が電流分散状況に及ぼす影響を明らかにした吉田ら⁷⁾の研究を参考に有限要素解析を適用した（図3）。

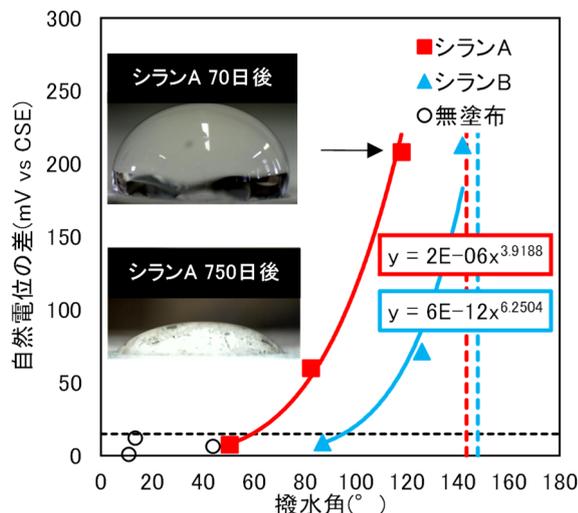


図2 撥水角と自然電位差との関係

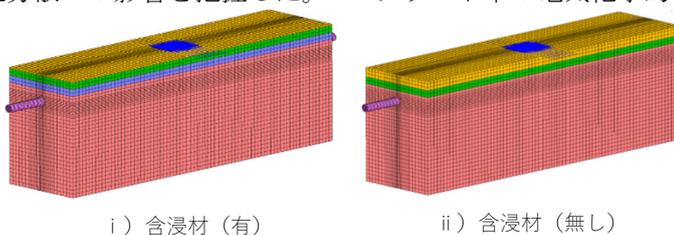


図3 解析モデルの例

これらの解析結果に基づき、式(1)により分極抵抗値の補正係数を算出した。図4は、解析により算出した電流分布の一例である。

含浸面（プローブ）及び非含浸面（埋込ステンレス）から測定された各周波数における分極抵抗値ならびに含浸面の測定結果を補正した結果の一例を示す（図5）。この結果、補正後の分極抵抗値は、0.01～0.02Hzの低周波帯において埋込ステンレスと同様の値を示す結果が得られた。ただし、0.05Hz以上の周波数になると埋込ステンレスによる分極抵抗値の結果と乖離が生じている。今回の解析では、電極とコンクリート表面の接触抵抗を実験値から測定することは困難であったため、接触の抵抗層を設けていない。そのため、0.02Hz以下と0.05Hz以上に接触抵抗が及ぼす影響度合いが異なると思われる、0.02Hz以下の周波数帯になると接触抵抗の影響が小さいものと考えられる。

以上のことから、表面含浸材が塗布されたコンクリートにおいて分極抵抗値を測定する場合には、含浸深さや含浸部の抵抗値などの情報を取得することで、本研究で提案する静電場解析を用いることで0.01～0.02Hzの範囲の測定周波数で測定された分極抵抗値を補正することが可能であり、適切に腐食環境を評価できることが分かった。ただし、0.1Hzで測定された分極抵抗値と腐食との関係性は報告されているが、それよりも低周波で測定された分極抵抗値と腐食の関係性については明らかにされていない。そのため、今後は低周波領域帯で測定された分極抵抗値と腐食との関係性について検討する必要がある。

0.01Hzと0.02Hzで測定された分極抵抗は、精度よく同一の補正係数によって補正可能であったことから、測定結果には、含浸層の抵抗や内部含水率の違いによる抵抗分布の影響が同様に反映されると考えられた。そこで、新たな含浸材が塗布されたコンクリートの腐食状態の評価方法の検討として、異なる周波数帯で測定された分極抵抗比を用いて各種環境下に暴露された無塗布供試体と含浸材を塗布した供試体の違いについて検討を行った結果の一例を図6に示している。

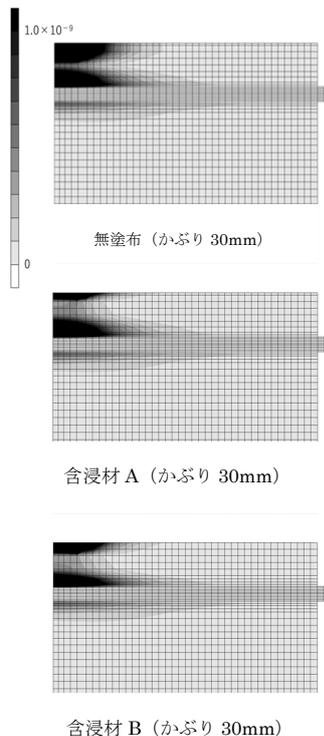


図4 各種供試体の電流分布

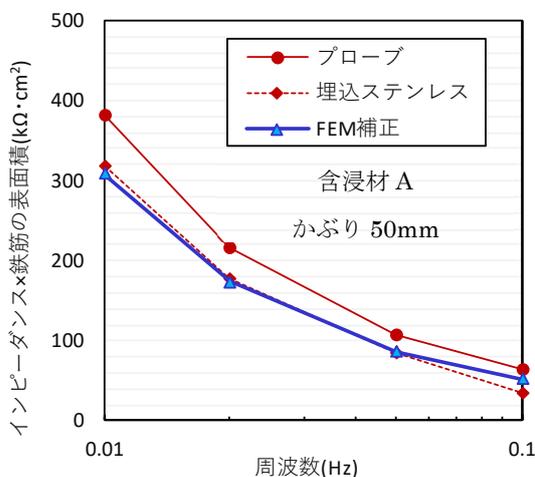


図5 補正後の各周波数での分極抵抗値

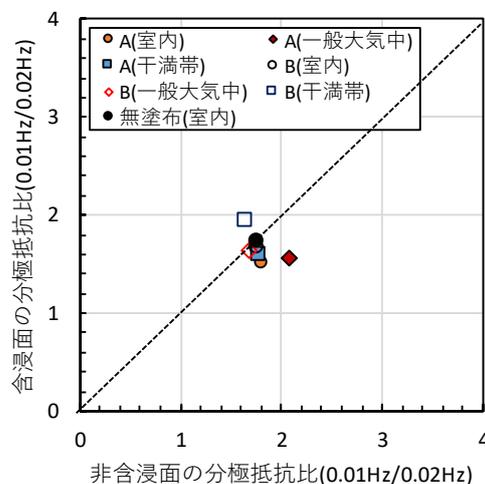


図6 測定位置ごとの分極抵抗比の関係

以下、得られた成果を示している。

- ・含浸材が分極抵抗に与える影響は、撥水角や吸水抑制効果よりも含浸深さの影響が大きい。
- ・提案した有限要素法による静電場解析によって、補正係数を算出することで、0.02Hz以下で測定された分極抵抗値を適切に補正することが可能であった。
- ・0.01Hzと0.02Hzで測定された分極抵抗値の比は、含浸面と非含浸面で同様の値を示すことが分かった。そのため、分極抵抗比と腐食の関係性を明らかにすることで、含浸材を塗布した構造物においても分極抵抗によって腐食状態を適切に評価できると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大塚柚人、櫛原弘貴、玉井宏樹、小池賢太郎、添田政司	4. 巻 19
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 361-366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y.Otsuka, H.Hazehara, D.N.Katpady, M.soeda	4. 巻 3
2. 論文標題 Corrosion evaluation of rebar using polarization resistance method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of assessment and intervention of existing structures	6. 最初と最後の頁 USB
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S.Fukami, H.Hazehara, D.N.Katpady, M.Soeda, Y.Sato	4. 巻 3
2. 論文標題 Influence of surface impregnation application on corrosion judgment by electrochemical method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of assessment and intervention of existing structures	6. 最初と最後の頁 USB
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大塚柚人、櫛原弘貴、金田尚志、児島あかり	4. 巻 41
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1817-1822
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大塚柚人、樫原弘貴、金田尚志、児島あかり	4. 巻 41
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 庄野克哉、樫原弘貴、添田政司、山田悠二	4. 巻 -
2. 論文標題 シラン系表面含浸材が自然電位の測定結果に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計2件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大塚柚人、児島あかり、樫原弘貴、添田政司、村上哲
2. 発表標題 表面含浸工法の適用が電気化学的手法による腐食判定結果に与える影響
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚柚人、樫原弘貴、添田政司、児島あかり
2. 発表標題 分極抵抗法による腐食判定に関する基礎的研究
3. 学会等名 第73回セメント技術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	玉井 宏樹 (TAMAI HIROKI) (20509632)	九州大学・工学研究院・助教 (17102)	
研究分担者	小池 賢太郎 (KOIKE KENTARO) (30781992)	鹿児島大学・理工学域工学系・助教 (17701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------