

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 5 年 6 月 1 5 日現在

機関番号：8 2 6 2 7

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021 ~ 2022

課題番号：2 1 K 2 0 4 5 6

研究課題名（和文）コンクリート内の鉄筋腐食探査のための腐食速度トモグラフィーの計測基盤の確立

研究課題名（英文）Establishment of measurement infrastructure of corrosion rate tomography for corrosion exploration of rebar in concrete

研究代表者

橋本 永手（Hashimoto, Nagate）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・研究官

研究者番号：5 0 9 0 9 8 7 7

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：鉄筋コンクリート構造物の劣化の一つに鉄筋の腐食がある。鉄筋の腐食は進行するほど補修・補強が困難になるため、腐食ひび割れの発生前に鉄筋の腐食を把握することが重要となる。コンクリート構造物中の鉄筋の腐食状態を把握する計測方法として、交流インピーダンス法がある。一般的な交流インピーダンス法は、鉄筋と測定機器との導通が必要であるため、ドリルなどで構造物を部分的に破壊する必要がある。利便性の面で障害となる場合がある。申請者らは本課題の中で鉄筋と測定器の導通が不要なインピーダンススペクトル測定手法を開発した。また、本配置の妥当性を証明するため、数式化したところ、本手法の妥当性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋の腐食は、コンクリート中という目視不能な状態で進行する難しく重要な劣化である。仮に、潤沢に維持管理予算があれば、詳細な状況を把握せずに構造物全体に対策を施すという選択肢もあり得るが、現実的には可能な限り効率的で効果的な対策を講じることが求められる。そのためには、構造物内のどの部分が腐食しているかを把握することが極めて重要である。高度経済成長期に建設された構造物はいよいよ劣化が顕著化してくる頃であり、膨大な構造物のストック量を考えれば、検査は簡便であることが望ましい。本課題で申請者が開発した手法は鉄筋腐食検査のハードルを大きく引き下げるものであり、構造物の維持管理に貢献し得る技術である。

研究成果の概要（英文）：One of the deteriorations of reinforced concrete structures is the corrosion of steel bars. The more corrosion progresses, the more difficult it becomes to repair or reinforce the reinforcing steel bars, and therefore, it is important to understand the corrosion of the reinforcing steel bars before corrosion cracks occur. The AC impedance method is a measurement method to determine the corrosion state of reinforcing bars in concrete structures. The AC impedance method requires continuity between the rebar and the measurement device, and thus requires partial destruction of the structure by drilling or other means, which is sometimes an obstacle in terms of convenience. The applicants developed an impedance spectrum measurement method that does not require conduction between the rebar and the measurement device in this task. In order to prove the validity of this method, mathematical formulas were developed to demonstrate the validity of this method.

研究分野：土木工学

キーワード：電気化学測定 交流インピーダンス 鉄筋腐食 鉄筋コンクリート

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

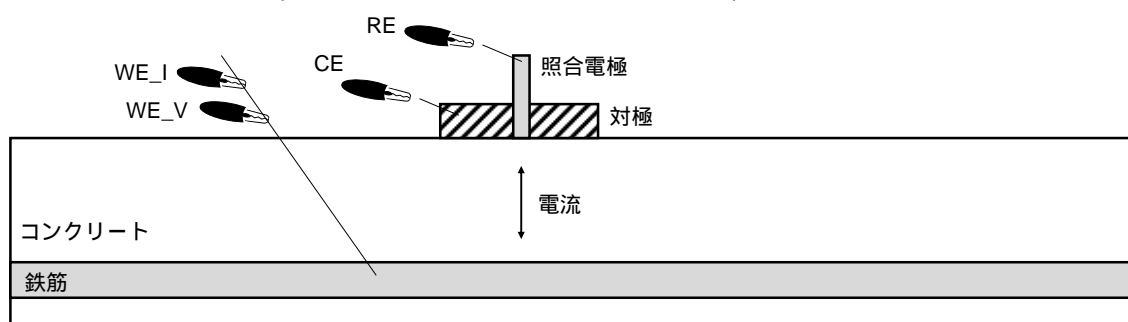
鉄筋コンクリート構造物の劣化の一つに鉄筋の腐食がある¹⁾。コンクリート中の空隙水は pH12 ~ 13 の強アルカリ性であるため、鉄筋は表面に不動態皮膜を形成し、腐食しにくい状態にある²⁾。しかし、コンクリートの中性化や外部から侵入する塩化物イオンの影響によって鉄筋は腐食し、その腐食反応に伴う鉄の体積膨張によって、コンクリートにひび割れが生じる³⁾。一般に、このひび割れを腐食ひび割れと呼ぶ。鉄筋の腐食は進行するほど補修・補強が困難になるため、腐食ひび割れの発生前に鉄筋の腐食を把握することが重要となる。

2. 研究の目的

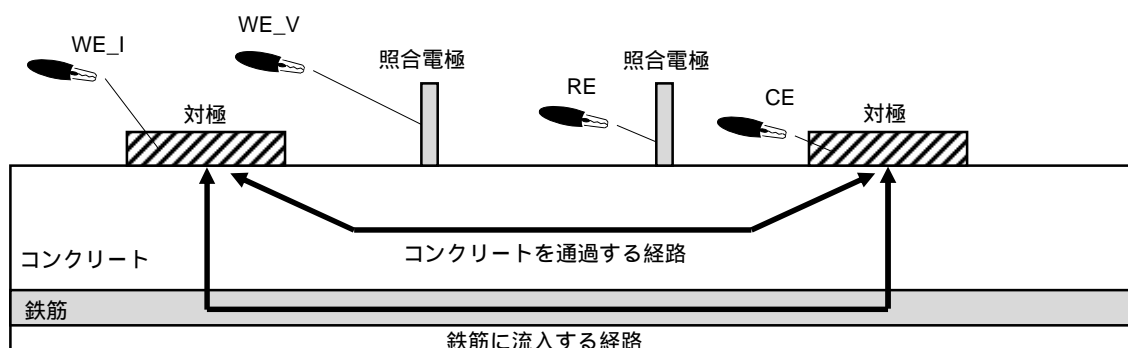
コンクリート中鉄筋の腐食は、構造物の耐力を著しく低下させ、なお且つ、コンクリート中という目視不能な状態で進行することから、土木工学の中でも難しく重要な「劣化」として位置づけられている。同じ構造物であっても、鉄筋の腐食速度は位置により異なることから、構造物の「どこ」が「どれほどの速度」で腐食しているかを計測することが望まれる。しかし、これに答える計測手法が無い現状である。鉄筋コンクリートの中から、鉄筋の腐食速度の速い箇所を見つける行為は、人体内から患部を見つける医療行為に似ている。中でも非破壊で人体内部を可視化する、X 線 CT 検査等のトモグラフィ技術は患部の発見に有効である。コンクリート中鉄筋の腐食箇所を可視化する腐食速度トモグラフィが開発できれば、構造物の「どこ」が「どれほどの速度」で腐食しているかを把握できる。これが本研究の核心である。

3. 研究の方法

鉄筋の腐食状態を把握する計測方法として、交流インピーダンス法がある⁴⁻⁸⁾。交流インピーダンス法は電極の配置が重要であり、3 電極法や 4 電極法と呼ばれる電極配置が多く用いられている。図-1 a) は一般的な 3 電極法の電極配置である。図中 WE_V、WE_I、CE、RE はポテンショスタットの端子で、それぞれ電位差測定用の作用極端子、電流印加用の作用極端子、対極端子、照合電極端子を示す。3 電極法では、コンクリート表面の測定点に対極と照合電極を配置する。WE_V、WE_I、CE、RE をそれぞれ図-1 a) に示すように接続し、照合電極・鉄筋間の電位差変化が規定量となるように対極・鉄筋間に交流電圧を印加、その際の電流を測定する。照合電極・鉄筋間の電位差変化を測定された電流で除することでインピーダンスを得る。これを様々な交流周波数で実施し、周波数-インピーダンスのプロファイルを求めたものがインピーダンススペクトルである⁹⁻¹¹⁾。一般的な 3 電極交流インピーダンス法では、WE_V、WE_I を鉄筋に接続する必要があることから、掘削などの工程で構造物を一部はつり出す必要があり不便な場合がある。一方で、端子が鉄筋に接続されていることから「電流の行き先」は鉄筋であり、すべての電流が鉄筋に流入すると考えてよい。これは、測定結果を解析する上で有利な点で、3 電極法の測定結果は定量的な議



a) 3電極法の電極配置



b) 4電極法の電極配置

図-1 3 電極法と 4 電極法の一般的な電極配置

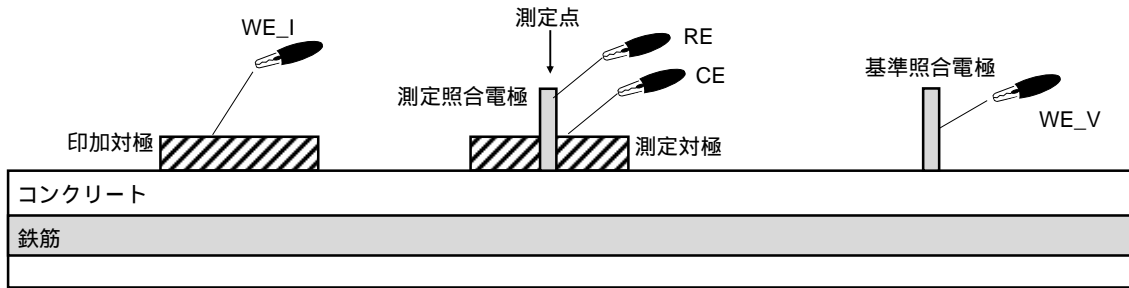


図-2 本手法の電極配置

論に耐えうる場合が多い。図-1 b)は一般的な4電極法の電極配置である。4電極法では、コンクリート表面に2つの対極を配置し、2つの対極の間に2つの照合電極を配置する。WE_V、WE_I、CE、REをそれぞれ図-1 b)のように接続し、照合電極間の電位差変化が規定量となるように対極間に交流電圧を印加、その際の電流を測定する。3電極法の場合と同様に照合電極間の電位差変化と電流からインピーダンスを算出する。このように、四電極法では、鉄筋と端子を接続する必要がなく、非破壊で測定可能な点で簡便性に優れている。非破壊で測定可能である点はいくつかの先行研究でも注目されており^{11,13,14)}、世界的に検討が進められている。しかし、図中で示す通り、4電極法では電流の一部が鉄筋に流入せずにかぶりを通過する。そのため、鉄筋に流入した電流を数値解析等で別途把握しなければ、測定結果に対して定量的な解釈を与えられない場合が多い。

ところで、筆者が本課題の中で開発した手法¹⁵⁾では、鉄筋と端子を接続することなく3電極法と同じインピーダンススペクトルが得られる。したがって、4電極法のように非破壊でありながら、3電極法のように定量的な測定結果が得られる手法である。

4. 研究成果

本手法は4電極法でありながら電極配置を工夫することで、3電極法と同じインピーダンススペクトルを得ようとするものであり、電極の配置が重要である。図-2に本手法の電極配置を示した。電極の設置の手順は、まずはコンクリート表面の測定点に対極、照合電極を1つずつ配置する。それぞれを測定対極、測定照合電極と呼ぶ。また、測定点から十分に離れた異なる2点に対極および照合電極を配置する。それぞれを印加対極、基準照合電極と呼ぶ。この印加対極および基準照合電極同士も十分離れるように配置する。このように、測定点から離れた箇所に電流印加点と電位基準点を設けることが本手法の特徴である。WE_V、WE_I、CE、REをそれぞれ図のように接続、照合電極間の電位差が規定量となるように対極間に交流を印加し、その電流値を測定する。本手法の測定例として、図-3に示す試験体で測定した結果を紹介する。コンクリート試験体の寸法は1600 mm×1600 mm×100 mmで縦方向と横方向に15本ずつ鉄筋を配置した。鉄筋は19mm×1600mmで、第一かぶりが50mm、第二かぶりが69mmとなるように配置した。コンクリート試験体は2種類で、鉄筋の全面を腐食させた「腐食試験体」と、全面が腐食していない「非腐食試験体」を用意した。腐食試験体の鉄筋は、コンクリートに埋設する前に大気中で3%の塩水を噴霧し腐食させた。鉄筋同士は溶接で電氣的に短絡し、端部箇所に3電極法用のリード線を接続した。コンクリート表面の左下端部を基準(x=0, y=0)として、測定位置は(150mm, 150mm)とし、測定対極と測定照合電極を配置した。また、(1450mm, 150mm)に印加対極を、

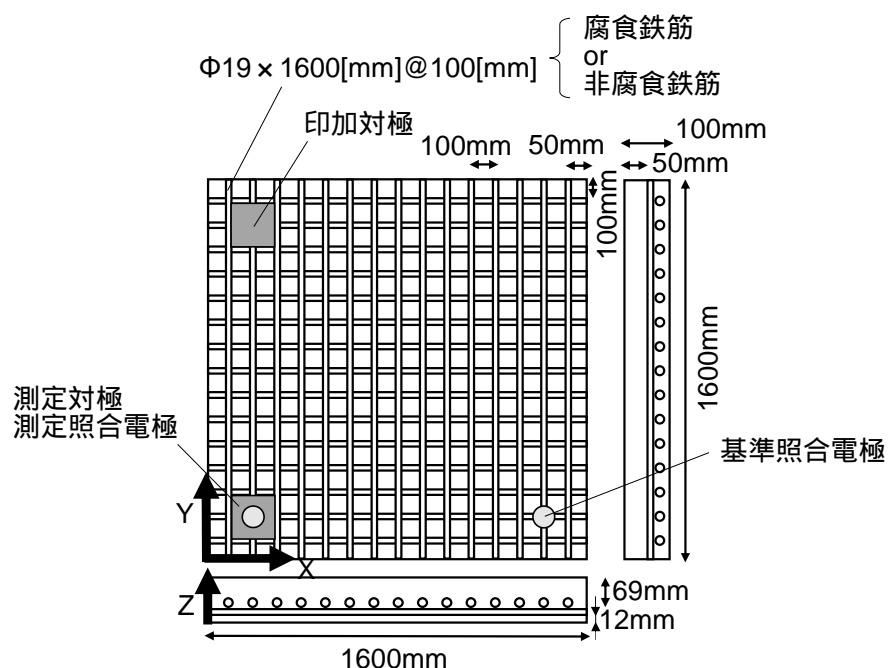


図-3 試験体の概要

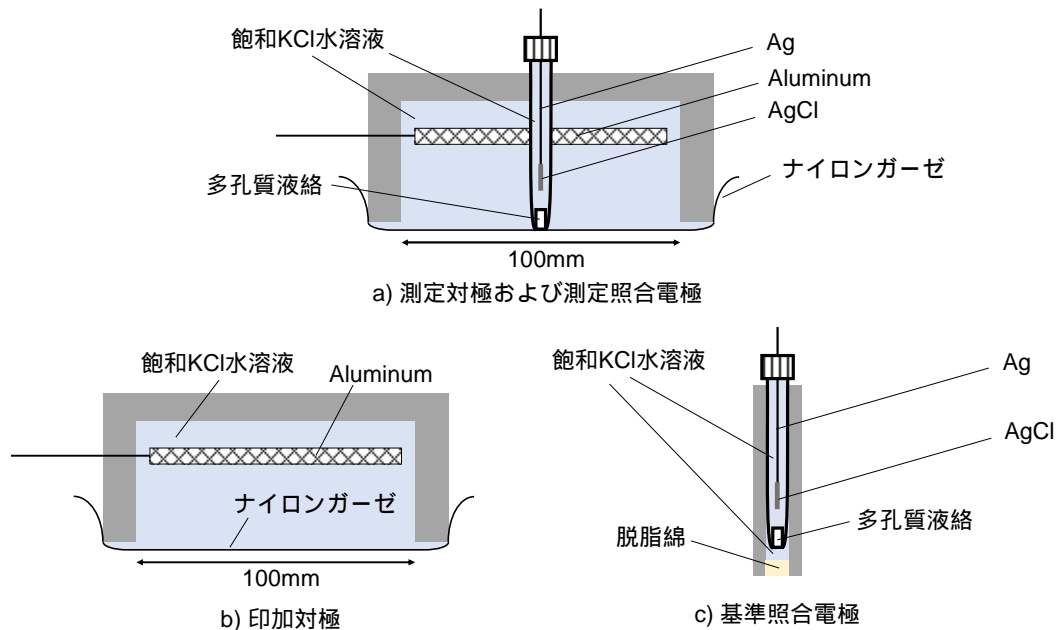


図-4 本実験で使用した電極

(150mm, 1450mm)に基準照合電極を配置した .CE, RE, WE_V, WE_I はそれぞれ, 測定対極, 測定照合電極, 基準照合電極, 印加対極に接続した. 本手法は特に電極の種類に対して制限はなく, 測定系に即した様々な電極を用いることができる. 本実験で使用した電極は図-4 に示す通りである. 対極部分は, アルミニウムと飽和 KCl ゲルで構成されており, コンクリートとの接着面が円滑になるようにナイロンガーゼでカバーした. コンクリートとの接着面の寸法は 100mm × 100mm である. 照合電極は SSE で, 内部溶液は飽和 KCl 溶液を用いた. 上記の測定系のセッティングで RE, WE_V 間の電圧が 30mV の AC 振幅となるように, CE, WE_I 間に電流を流した. 測定周波数は 50mHz から 100Hz とした.

図-5 が得られたスペクトルの結果である.

比較のために 3 電極法の測定結果も記載した. 本手法で得られたインピーダンスと 3 電極法で得られたインピーダンスが概ね一致していることがわかる. 両手法のスペクトルともに高周波領域から低周波領域近づくほどインピーダンスは大きな値となった. また, 周波数変化に伴うインピーダンスの変化は腐食鉄筋の方が健全鉄筋に比べ小さかった. これは既往の研究で多く報告されているように, 鉄筋腐食によるインピーダンスの低下が反映されているものである. したがって, 本手法では鉄筋と端子を接続していないにもかかわらず 3 電極法と同等のインピーダンススペクトルが取得可能であり, 得られたスペクトルを用いて鉄筋の腐食状態を把握することが可能である.

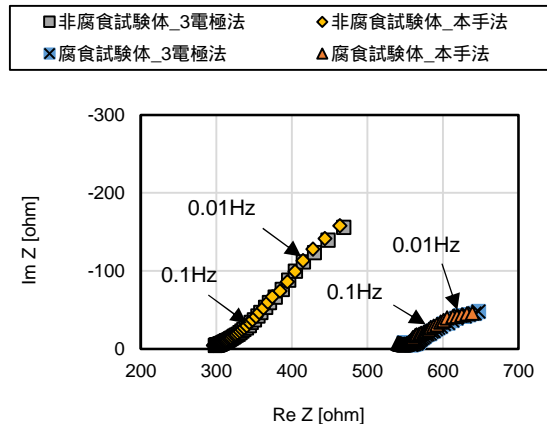


図-5 本手法の測定結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1 . 著者名 Hashimoto Nagate, Tanaka Motoki, Kaneko Yasuaki, Kato Yoshitaka, Hirama Akinobu	4 . 巻 -
2 . 論文標題 Development of a method for obtaining Nyquist plots identical to those of the three-electrode AC impedance method in concrete-embedded rebar without requiring electrical continuity	5 . 発行年 2023年
3 . 雑誌名 Journal of Applied Electrochemistry	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） 10.1007/s10800-023-01891-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 コンクリート中鉄筋の腐食箇所検出装置	発明者 加藤佳孝、橋本永手、平間昭信，金子泰明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-058610	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------