

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82641

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01514

研究課題名(和文) ナノテク計測技術を用いた既設鉄筋コンクリート構造物の非接触腐食診断法の開発

研究課題名(英文) Development of non-contact corrosion diagnosis of existing reinforced concrete structures using nano-measurement technology

研究代表者

朱牟田 善治 (Shumuta, Yoshiharu)

一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・副研究参事

研究者番号：90371434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉄筋コンクリート内部鉄筋の腐食状態を、非破壊で、短時間に測定可能な方法論を提案した。まず、鉄筋腐食箇所を絞り込むために、空間磁界マッピング法を提案した。提案した手法を鉄筋の埋設されている実構造物に適用し、コンクリート壁の内部の配筋状態をある程度正確に把握できることを明らかにした。次に、鉄筋コンクリートの腐食状態で変化するインピーダンス性状に着目した四端子交流インピーダンス法(四端子法)を提案した。提案した手法を鉄筋コンクリート試験体に適用した結果、内部鉄筋の腐食速度を完全非破壊で定量評価できることを明らかにした。最終的に、提案した方法論の実用化に向けた課題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物が一斉に改修・更新時期を迎え、その老朽化対策が課題となっている。一方、既設の鉄筋コンクリート構造物を対象として、鉄筋の腐食状態を精度よく把握することは一般に困難であった。これに対し本研究は、既設鉄筋コンクリート構造物の内部鉄筋腐食状態を、構造物表面から非破壊でかつ短時間に現場で計測することを可能とした。また、提案した一連の方法論は、ナノテクノロジー計測技術を既設鉄筋コンクリート構造物に応用した学際的かつ画期的な鉄筋腐食診断技術である。上記の理由から、本研究結果は、社会的にも学術的にも非常に価値の高い成果であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a non-destructive and short-time measurement methodology for the corrosive state of reinforcing concrete. First, we proposed a spatial magnetic field mapping method to narrow down the corroded parts of the reinforcing bars. The proposed method is applied to a real structure with embedded reinforcing bars. As a result, it was clarified that the state of reinforcement inside the concrete wall can be identified. Next, four terminal alternating current impedance method (four terminal method) was proposed, which focused on impedance characteristics changing in the corrosion state of reinforced concrete. The proposed method is applied to reinforced concrete specimens. As result, it was clarified that the corrosion rate of internal reinforcing bars can be quantitatively evaluated in a completely non-destructive manner. Finally, we clarified the issues for practical applications of the proposed methodology.

研究分野：地震工学

キーワード：腐食鉄筋 交流インピーダンス法 ホールセンサ 四端子計測 非破壊検査 鉄筋コンクリート

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造物を長期間供用するためには、構造物の劣化状態を精度よく把握し、適切な維持管理を行う必要がある。鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食状態を把握する手法として、土木学会などで指針化されている分極抵抗法が挙げられる。分極抵抗法は、鉄筋自体の腐食状態を代表する分極抵抗(印加電流に対する鉄筋の抵抗値)を求めることが目的となる。分極抵抗を求めるためには、多様な周波数の sin 波を用いる交流インピーダンス法や、単一なパルス波を用いる非接触電気パルス応答解析法[1]などが提案されているものの、以下のような課題がある。

- ① 腐食に伴う電気的特性を計測するためには、既設構造物を一部破壊して鉄筋を露出させ、電氣的に接続しなければならない(交流インピーダンス法のみ)。
- ② 正確な鉄筋位置、鉄筋かぶり厚、および鉄筋径が明らかでない場合には、測定できない。
- ③ 交流インピーダンス法では、多様な周波数の電極抵抗値(インピーダンス)を、周波数を変えながら測定しなければならない。また、非接触電気パルス応答解析法による単一なパルス波を用いた場合でも 1 回あたりの測定範囲が狭いため、位置を変えながら複数回測定する必要がある。その結果、どちらの方法も測定に長時間必要となる。
- ④ 分極抵抗測定時に印加する電流が鉄筋とコンクリート中に広がって不均一に減衰する(弱くなる)ことにより、精密に内部鉄筋の局所的な腐食状態を評価できない。特に、かぶり厚が大きくなるほどその傾向は顕著になる。

2. 研究の目的

本研究では、広範囲にわたる鉄筋コンクリート内部鉄筋の腐食状態を、非破壊で、精度よく、短時間に、かつ現場で測定可能なセンサシステムを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本目的を達成するために、鉄筋位置と腐食箇所の把握(空間磁界マッピング法)、鉄筋腐食レベル・周辺(コンクリート)腐食環境レベルの把握(広帯域インピーダンス法+多端子法)、および鉄筋余寿命の推定(鉄筋余寿命推定法)の要素技術を試作してシステム化する。

(1) 空間磁界マッピング法の提案

大型鉄筋コンクリート構造物を想定し、まず、詳細に計測すべき鉄筋位置と腐食箇所を絞り込む手法として、永久磁石と鉄筋との間に結ばれる磁力線の空間分布(空間磁界)を測定する方法を提案する。

(2) 広帯域インピーダンス法+多端子法

(1)で特定した鉄筋腐食箇所を対象として、鉄筋の腐食レベルと周辺(コンクリート)腐食環境レベルを分離して測定する。ホワイトノイズ電流(全周波数で同じ振幅値をもつ電流)を用いることにより、交流インピーダンス法に比べて圧倒的短時間であらゆる周波数帯のインピーダンス(電極の抵抗)とキャパシタンス(腐食性イオン濃度)を精度よく測定できる手法を提示する。この技術に加え、非破壊で広範囲に鉄筋とコンクリートに起因する抵抗を分離して測定する手法(以下、多端子法と呼ぶ)を提案する。

(3) 鉄筋余寿命評価法の提案

(1)で特定した部位に(2)で開発した測定法を実装したセンサを設置し、長期に傾向管理してデータを蓄積し、既設鉄筋コンクリート構造物の余寿命が推定可能な方法論を提案する。

4. 研究成果

(1) 空間磁界マッピング法の提案

永久磁石に鉄筋を近づけると、永久磁石からの漏れ磁束を鉄筋が吸い込む性質により、永久磁石周囲の磁界が変化することに注目した。実際に、ネオジウム磁石の近くに磁気センサを配備したコンパクトな試験機を試作し、鉄筋試験片の上空をスキャンすると、この磁界の変化を高感度に検知できることを実証した。

図1は、太さ19mmの鉄筋試験片上空を試験機で手動ラインスキャンしている際の状況を撮影した写真と、測定結果(専用ソフトウェアの画面)である。スキャン時間は10秒足らずであり、結果が視覚的に分かりやすく、計測終了

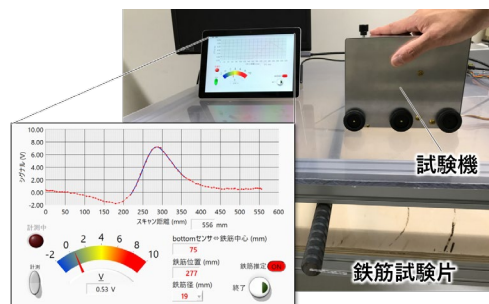


図1 試験測定の様子(写真)と、計測結果(左下)。鉄筋試験片上空(センサと鉄筋中央の距離約70mm)で試験機を転がしてラインスキャンすると、左下のグラフが得られ、瞬時に鉄筋深さと位置などが表示される。

と同時に鉄筋の位置や深さを専用ソフトウェアが瞬時に推定してユーザーに通知する仕組みとなっている。今のところ、診断可能な鉄筋の深さ(かぶり深さ)は100 mm以上、鉄筋径は6-29 mmだが、今後さらに診断性能を伸ばせる余地があると考えている。

図2は建屋のコンクリート外壁を計測している様子である。タブレットの画面に見えている計測結果のように、壁の中に格子状かつ周期的に埋設されている鉄筋の位置等の情報を瞬時に・正確に・視覚的に得ることができる。また、周囲の鉄筋との様子の違いなども再現性良く調べることができる。

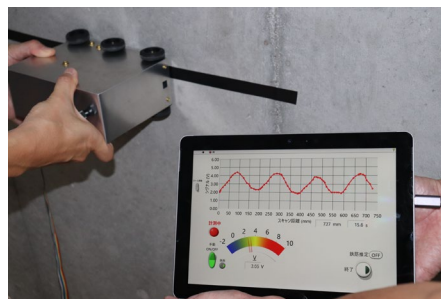


図2 屋外のコンクリート外壁を試験測定している様子。

通常の鉄筋と、破断した鉄筋試験片上空を2次元スキャンした結果を比較すると、鉄筋の破断箇所の診断も可能であることも分かった。現状、2次元スキャンは自動計測ロボットを用いているが、その高速化や、磁気測定以外の手法も組み合わせ、さらにはAI解析技術なども駆使することにより、鉄筋の埋設構造や腐食状態なども含む健全状態を3次的に可視化する技術を構築したいと考えている。

(2) 広帯域インピーダンス法+多端子法

図3(a)に示すように、コンクリート構造物の表面に4個の端子(電極)を設置して広帯域の周波数の電流を印加し、インピーダンス性状を測定する四端子交流インピーダンス法(四端子法)を考案した。この手法を、鉄筋を埋設したモルタルおよびコンクリート試験体に対して適用した。その結果、図3(b)に示すように完全非破壊にも関わらず、コンクリートの電気抵抗と関連する端子間溶液抵抗 R_{s-four} (Ω)と、鉄筋の腐食速度と関連する端子間分極抵抗 R_{p-four} (Ω)を分離して算出できることが明らかとなった。これは、内部鉄筋とコンクリート界面の腐食反応抵抗である分極抵抗 R_p ($k\Omega cm^2$)が腐食状態や周波数に応じて変化し、表面のみからの測定でも鉄筋に電流が流入する条件下では、その影響を検知できるためである。本研究では計測装置として高感度のインピーダンスアナライザを導入し、さらに電極の接触に従来のスポンジではなくハイドロゲルシートを使用することで、測定精度が劇的に向上したため、 R_{p-four} (Ω)の測定に成功したと考えられる。

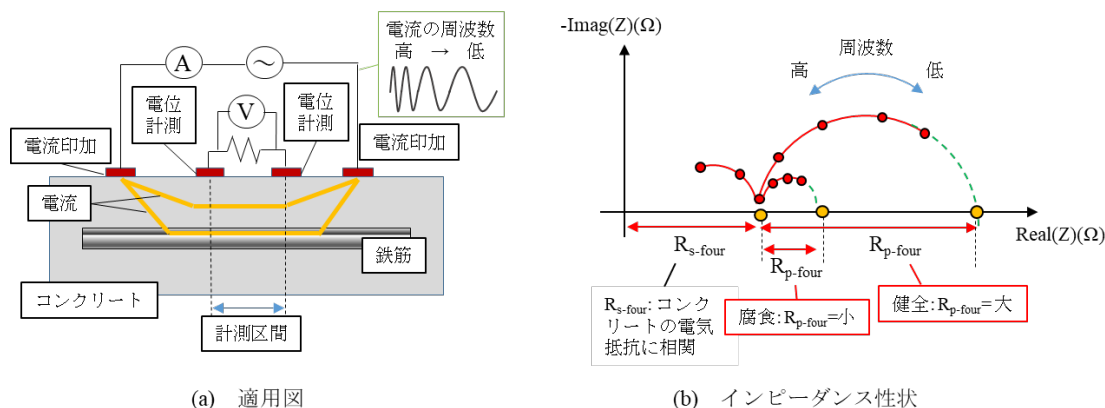


図3 四端子交流インピーダンス法の概要

四端子法では、端子の間隔や測定面からの鉄筋深さなど様々な条件で測定値が変化することから、測定条件を変化させた測定実験および解析を行い、測定値の変化傾向を把握した。そして、その変化を考慮した腐食速度指標として正規化端子間分極抵抗 NR_{p-four} ($=R_{p-four}/(R_{s-four-N}-R_{s-four})$)を提案した。 $R_{s-four-N}$ は鉄筋の影響(鉄筋への電流流入による抵抗値低下)がない場合の端子間溶液抵抗を意味しており、内部鉄筋に対して垂直に端子を配置して測定することにより算出できる。提案指標と、従来法の腐食速度指標を比較した結果を図4に示す。ここで、従来法の腐食速度指標とは、微破壊をとまなう交流インピーダンス法によって測定、算出した分極抵抗 R_p ($k\Omega cm^2$)のことである。

結果、対象の寸法や測定条件によらず両指標は高い正の線形相関にあることが明らかとなった。これにより、測定対象に応じて内部鉄筋に電流が流入するように端子配置を設定することができれば、完全非破壊で内部鉄筋の腐食速度を定量的に評価することが可能となった。ただし、この結果は実構造物ではなく、試験体に対する適用から得られたものであることには注意が必要である。

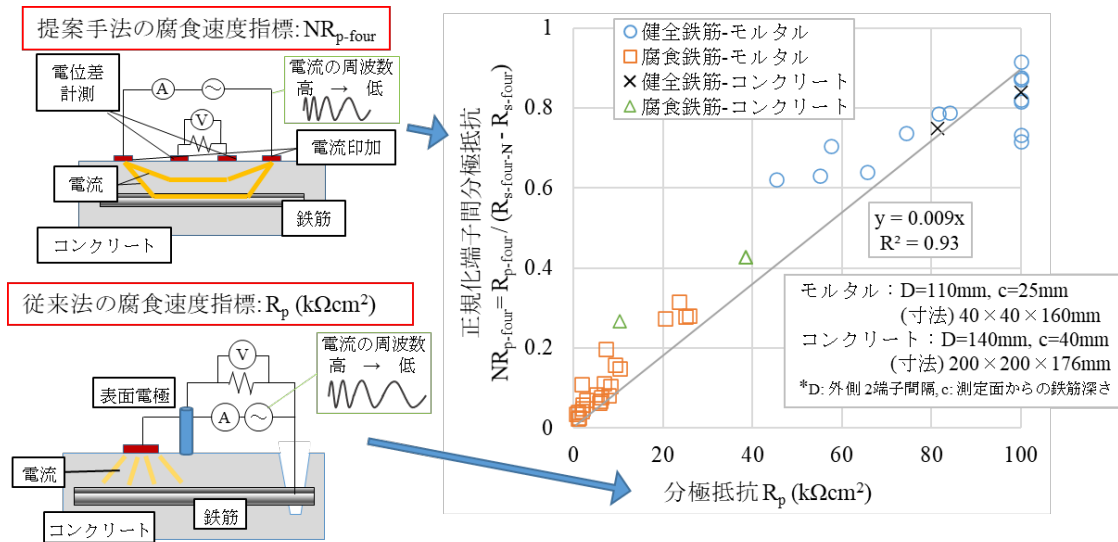


図4 提案手法と従来法の比較結果

さらなる検討として、不均一に内部鉄筋を腐食させた長尺コンクリート試験体(寸法: $130 \times 65 \times 800mm$)に対して、測定位置を変えながら四端子法を適用した。その結果、腐食が大きい箇所では腐食速度が大きいと判定できることが明らかとなった。この結果は、四端子から多端子へ拡張して、多電極測定を行う場合、腐食範囲と腐食程度の同時把握が可能となり、より広範囲な腐食判定を同時に行うことが今後可能となることを示唆している。

今後の課題として、測定の迅速化や広範囲のコンクリート構造物の腐食状況を自動で算出できるプログラムや方法の開発などが挙げられる。

(3) 鉄筋余寿命評価法の提案

コンクリート構造物の塩害劣化を想定すると、まず外部環境からコンクリート内部に塩分が浸透し、鉄筋位置まで所定の量が到達し腐食が発生、進行する。腐食進行によるさび生成にともない鉄筋が膨張し、コンクリートにひび割れを生じさせる。表面に腐食ひび割れが顕在化する時期を寿命(限界状態)とすると、余寿命評価を行うためには、鉄筋の腐食速度の経時変化を取得することが重要となる。

そこで、構造部材を模擬した試験体を臨海環境下に暴露し、6ヶ月に1回程度の間隔で定期的に内部鉄筋の腐食速度測定を行っている。現場測定の様子を図5に示す。測定は、四端子法および従来の交流インピーダンス法によって行っている。取得した腐食速度の経時変化を時間積分することにより累積腐食量を推定することができ、試験体を解体して鉄筋を取り出して腐食重量を実測することにより精度検証を行うことができる。しかし、今回の研究期間では検証を行うまでには至れず、今後も継続的にデータ取得を続ける必要がある。

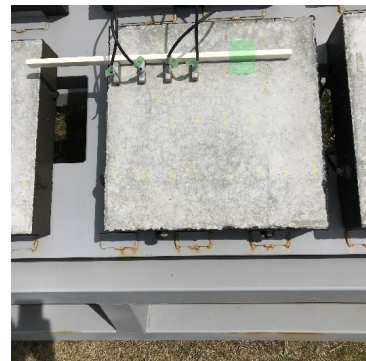


図5 暴露試験体に対する腐食速度測定の様子

現場適用から得られた知見として、時間経過にともなって試験体の表面に炭酸カルシウムが生成し、測定データのばらつきを増大させることがわかった。印加電圧を高くしてシグナルノイズ比(SN比)を増加させるといった工夫が今後必要である。

引用文献

- [1] Giatec Scientific Inc. (CA), Electrical methods and systems for concrete testing, US 2017-0108456, 2017. 4. 20.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 金光 俊徳, 小野 新平	4. 巻 2019
2. 論文標題 非破壊による鉄筋腐食速度評価法の提案 モルタル試験体を用いた四端子交流インピーダンス法の適用性検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電力中央研究所 研究報告書	6. 最初と最後の頁 1-23
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 金光 俊徳, 小野 新平	4. 巻 Vol174, No.4
2. 論文標題 完全非破壊によるコンクリート内部鉄筋の腐食速度評価法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2	6. 最初と最後の頁 pp.315-331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejmcs.76.4_315	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 千葉 大地	4. 巻 Vol.41, No.3
2. 論文標題 永久磁石を利用したコンクリート埋設鉄筋可視化手法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機能材料	6. 最初と最後の頁 pp.56-62
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 無
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshinori Kanemitsu, Shimpei Ono
2. 発表標題 Experimental and Analytical Study on the Measurement Factors for the Four Probe AC Impedance Method
3. 学会等名 NACE East Asia & Pacific Area Conference, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金光 俊徳, 小野 新平
2. 発表標題 小型モルタル試験体計測に基づく四端子交流インピーダンス法を用いた腐食速度評価法の提案
3. 学会等名 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金光 俊徳, 小野 新平
2. 発表標題 非破壊の腐食速度法廷法を用いたコンクリート中鉄筋の腐食速度の相対評価
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 埋設鋼材検出装置、埋設鋼材検出方法および埋設鋼材検出プログラム	発明者 金光 俊徳, 小野 新平	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2019-151476	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 腐食検出装置、腐食検出方法および腐食検出プログラム	発明者 金光 俊徳, 小野 新平	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2019-051714	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 コンクリートデバイスおよびその製造方法、ならびに電子機器	発明者 小野 新平	権利者 一般財団法人電力中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2019-001600	出願年 2019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
研究分担者	千葉 大地 (Chiba Daichi) (10505241)	大阪大学・産業科学研究所・教授 (14401)	
研究分担者	小野 新平 (Ono Shimpei) (30371298)	一般財団法人電力中央研究所・材料科学研究所・上席研究員 (82641)	
研究分担者	金光 俊徳 (Kanemitsu Toshinori) (60815968)	一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員 (82641)	

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