

腐食測定機「Dr.CORR」(ドクターコロ)を用いた鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の腐食速度推定

Corrosion Rate Estimation of Rebar in Reinforced Concrete Structures Using the Corrosion Measuring Machine “Dr. CORR”

金子 泰明^{※1}
Yasuaki Kaneko

橋本 永手^{※2}
Nagate Hashimoto

平間 昭信^{※3}
Akinobu Hirama

加藤 佳孝^{※2}
Yoshitaka Kato

山路 徹^{※4}
Toru Yamaji

定本 真明^{※5}
Masaaki Sadamoto

松浦 貢^{※5}
Mitsugu Matsuura

山口 明則^{※5}
Akinori Yamaguchi

【要旨】

鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の腐食状態を把握するためには、はつり出した鉄筋と測定機器を接続し、測定箇所プローブを接触させて測定する方法や、構造物からコンクリートの一部を採取して中性化深さや塩化物量を測定することで鉄筋の腐食環境を評価する方法がある。また、鉄筋の腐食状態を測定する場合、測定中にプローブを手で保持し続ける必要性から計測に複数の人員が必要であり、苦渋作業も伴っていた。そこで、完全非破壊で測定できる原理を電気化学理論と解析によって裏付けた腐食測定機「Dr.CORR」を開発した。これまでに試験体および構造物での実証を重ね、従来の計測と同等の評価が可能であることを確認した。また、プローブの軽量化と特殊ゲルの使用によるハンズフリーでの測定を可能とし、効率的な計測作業を可能とした。

【キーワード】 鉄筋腐食 維持管理 非破壊検査 交流インピーダンス

1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備され、建設後 50 年以上経過する構造物が増大する中で、コンクリート構造物の維持管理に対しては、劣化が進行している構造物への対策が急務である。コンクリート構造物の維持管理に掛かるコストを削減するためには、劣化による変状が顕在化する前に対策を講じる予防保全的な考え方が有効である。

コンクリート構造物の劣化の一つとして、コンクリート中の鉄筋腐食がある。一般に、コンクリート中の空隙水は pH12~13 の強アルカリ性であり、鉄筋の表面には不動態被膜が形成されることで腐食しにくい状態にある。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の腐食が進行するほど、補修や補強に掛かる時間や費用が多くなるため、効率的な維持管理にはひび割れなどの変状が顕在化する前に鉄筋腐食を把握することが重要である。

鉄筋腐食を把握する方法として交流インピーダンス法がある^{1)~5)}。交流インピーダンス法は電極の配置が重要であり、3 電極法と呼ばれる電極配置では、鉄筋に直接電流を流すために鉄筋と測定装置を接続する必要がある。そのため、構造物に 3 電極法を適用する場合には、かぶりを一部はつる必要がある。また、鉄筋と測定装置を接続することなく測定可能な 4 端子配置の分極抵抗測定⁶⁾が

検討されているが、高度な数値解析を伴う。

このような背景を受けて、筆者らはコンクリート中の鉄筋の腐食状態を非破壊で簡便に測定する手法について検討を進め、腐食測定機「Dr.CORR」(ドクターコロ)を開発した(図-1)。本報では、測定の概要、測定方法、適用範囲、適用事例について報告する。

2. 非破壊での鉄筋のインピーダンス測定

筆者らが開発した手法(以下、本手法と称する)は電極配置を工夫することで、鉄筋と接続することなく 3 電極法と同じインピーダンススペクトルを得ることが可能である。本手法の電極配置を図-2に示す。コンクリート表面の測定点に対極を 1 つ、照合電極を 1 つ配置する。また、測定点から十分離れた異なる 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



図-1 腐食測定機本体およびプローブ

1.技術研究所 研究開発 G

2.東京理科大学 社会基盤工学科

3.土木本部 土木技術部

4.港湾空港技術研究所

5.クリアパルス株式会社

ぶ。この印加対極および基準照合電極同士を十分離れるように配置することで、対極間のコンクリート中・表面に電流が流れず、対極間の電流が全て鉄筋に流れる。また、基準照合電極が対極間に流れる電流の影響を受けないことで鉄筋のインピーダンスを得ることができる⁷⁾⁹⁾。なお、以降は照合電極および対極をセットでプローブと称する。

3. 腐食測定機「Dr.CORR」

3.1 Dr.CORRの特徴

Dr.CORRの主な特徴を次に示す。

- ・コンクリート中の鉄筋をはつり出すことなく鉄筋のインピーダンスが測定可能である。
- ・測定に使用する3つのプローブは、独自に開発した粘着導電性ゲルで固定できるため、測定中はハンズフリーとなる。
- ・パソコンやモバイルバッテリーからの給電で測定が可能である。
- ・測定されたインピーダンスから、鉄筋の腐食速度を算出、表示する。

3.2 測定方法

測定の概要図を図-3に、測定実施状況を写真-1に示す。測定するためには事前に鉄筋の位置出しが必要であり、腐食速度の算出にあたっては、かぶり、鉄筋径および鉄筋間隔の値が必要である。なお、測定時点でかぶり、

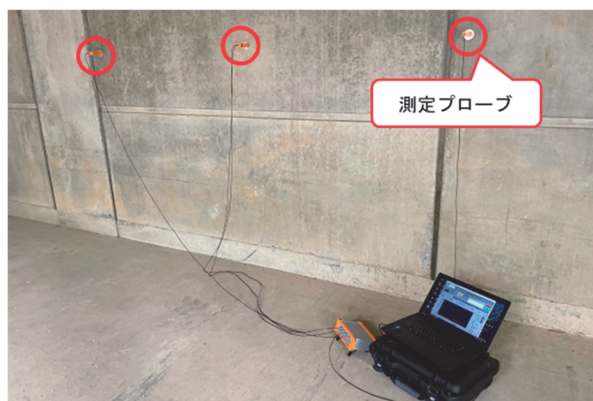


写真-1 測定実施状況例

鉄筋径および鉄筋間隔が不明であってもインピーダンスの測定は可能であり、測定後に各値を設定することで、腐食速度を算出することも可能となる。

3つのプローブを粘着導電性ゲルによってコンクリート表面に張り付ける。測定対象鉄筋の直上にプローブ（黒・青）を設置し、測定対象と導通している鉄筋上にプローブ（緑）およびプローブ（赤）を設置する。それぞれのプローブは直線距離で1300mm以上離れるように設置する。プローブ間距離が1300mm以上確保され、測定対象の鉄筋と導通している鉄筋上に各プローブを設置していれば測定可能であるため、プローブは必ずしも直線上に配置する必要はない。なお、プローブ間距離が確保できない状況であれば、従来の測定機と同様に、鉄筋の一部をはつり出して従来の3電極法として測定が可能である。

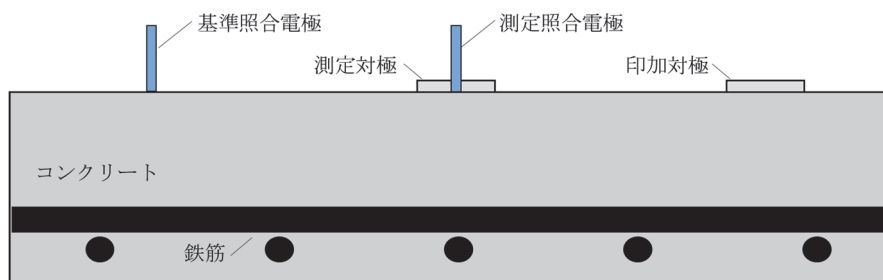


図-2 本手法の電極配置

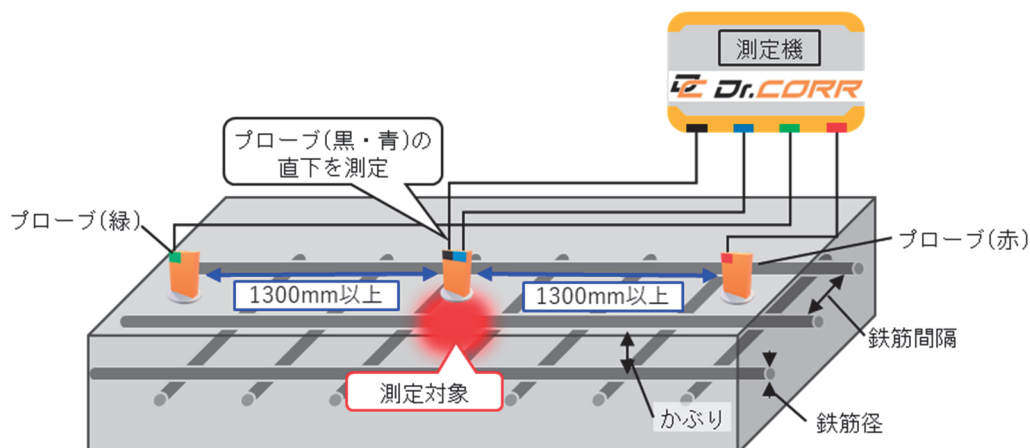


図-3 本手法による測定の概要図

プローブの設置が完了した後は、専用のソフトウェアを使用してインピーダンスを測定する。測定および解析が完了した画面を図-4に示す。算出された腐食速度からレベル判定が可能である。初期設定ではCEB（ヨーロッパコンクリート委員会）のWorking Party V/4.1, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft.4), BBRI-CSTC-WTCB 12/02/1997」に掲載されている評価基準を用いてレベル判定しており、腐食速度が大きいほどレベルが大きくなる表示となっている。初期設定のレベル判定の閾値を表-1に示す。レベル判定に用いる腐食速度の閾値は、任意で設定することも可能である。

3.3 測定の条件

Dr.CORRでの測定に際しては、印加電流が鉄筋に流入する必要がある。そのため、エポキシ樹脂塗装鉄筋が使用されている場合やコンクリート表面に絶縁性の表面被覆が施工されている場合には適用できない。また、ポリマーセメントモルタルやシラン系含浸材、かぶりが大きく乾燥した場合など、コンクリート抵抗が著しく高くなる条件では、正しく評価できない可能性があることに注意が必要である。表面被覆が施工されている場合は、評価する鉄筋およびプローブを設置する箇所のみ表面被覆を取り除くことができれば測定が可能となる。

4. 鉄道高架橋補修工事での測定事例

4.1 測定の概要

断面修復工法による補修が計画されている鉄道高架橋の床版にて、Dr.CORRによる腐食判定を実施した。測定

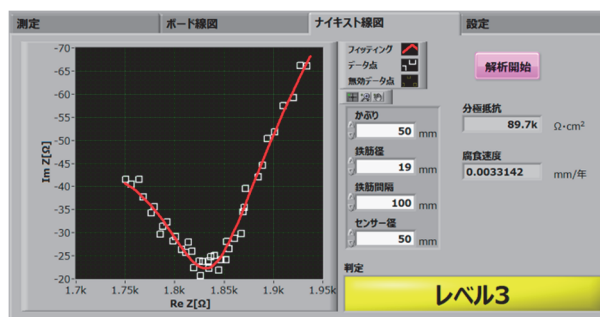


図-4 測定・解析結果画面

表-1 レベル判定の初期設定

腐食速度[mm/年]			
レベル5閾値	0.01143	表示文字	レベル5 表示色
レベル4閾値	0.005715	表示文字	レベル4 表示色
レベル3閾値	0.002286	表示文字	レベル3 表示色
レベル2閾値	0.001143	表示文字	レベル2 表示色
レベル1	閾値初期化	表示文字	レベル1 表示色

対象は、コンクリートに内在塩化物イオンが存在し、中性化の進行が確認されていた。測定状況を写真-2に示す。かぶりは2cm程度であり、コンクリートは乾燥している状態であった。事前の測定として、200kHz、60mVの交流電流を印加した結果、6kΩ程度のコンクリート抵抗であった。

4.2 非破壊法と従来法の比較

鉄筋と測定機を接続する従来の3電極法と、本手法の測定結果を比較し、本手法による測定の精度を検証した。同じ箇所での測定結果を図-5に示す。図中にプロットされる半円は容量性半円と呼ばれ、半円と実数部Re Z軸からなる直径が分極抵抗となる。測定結果のフィッティングカーブより求めた分極抵抗は、従来法で700Ω、本手法で750Ωとなり、かぶりをはつらない本手法でも従来の3電極法と同程度の精度を有することを確認した。

4.3 Dr.CORRによる判定結果と鉄筋の状態

専用ソフトウェアの測定結果画面を図-6に、測定箇所の鉄筋状態を写真-3に示す。測定ではノイズの少ないインピーダンススペクトルを得ることができ、CEBの評価基準を用いるとレベル4と判定された。レベル4は、中～高程度の腐食速度と判断される。はつり出した鉄筋には腐食が広範囲に存在し、判定された腐食速度レベルと整合していた。



写真-2 鉄道高架橋補修工事での測定状況

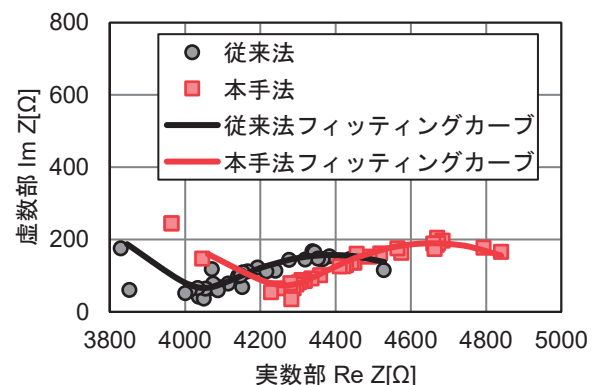
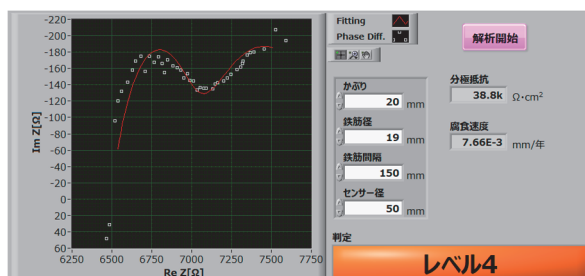


図-5 従来法と本手法のインピーダンス測定データ
(ナイキスト線図)



図ー6 鉄道高架橋での測定結果



写真ー3 測定箇所の鉄筋状態

5. おわりに

構造物の維持管理は予防保全の考え方に基づいた維持管理が前提となっているが、鉄筋の腐食による浮きやひび割れは発生を予測することが難しく、変状が顕在化した箇所以外でも腐食が進行している場合がある。そのため、変状が顕在化した箇所のみを補修しても、補修した周辺で変状が顕在化していく。このように、鉄筋の腐食程度および箇所が正確に把握できないことが、効率的な維持管理を難しくしていた。

本手法は、コンクリート構造物の劣化の主要因である鉄筋の腐食を非破壊かつ定量的に把握することができるため、妥当性の高いLCCの算定が可能となり、複数の構造物を管理する場合の優先順位や、長期的な予算の平準化が可能となるなど、従来に比べて効率の良い維持管理計画を立案することが可能となる。

本手法がコンクリート構造物の維持管理に貢献すれば何よりである。

Summary Two methods are used to assess corrosion of rebars in reinforced concrete structures. One involves placing the probe against the measurement point while connecting the rebars to a measurement device and the other involves collecting a piece of concrete to estimate the corrosion state of the rebars by measuring the neutralization depth and chloride content. The first method requires several workers because it involves the physically stressful task of manually holding the probe up during the measurement. In response, we developed a completely nondestructive corrosion measuring instrument, Dr. CORR, whose operating principles are based on electrochemical theory and analysis. Repeated demonstrations with test specimens and structures confirmed its validity as an instrument capable of making accurate measurements equivalent to conventional measurement systems. In addition, the probe is lightweight and allows hands-free measurements with the adoption of a special gel, eliminating the stress of holding up the probe.

Key Words : Rebar Rebar Corrosion, Maintenance, Non-Destructive Testing, AC Impedance

謝辞 : 本手法の開発、現場測定および展開に際して、エフティエス株式会社ならびに関係者各位の皆様方からご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を申し上げます。

【参考文献】

- 1) C. Andrade, L. Soler, C. Alonso, X. R. Novoa, and M. Keddari, (1995), Corros. Sci., 37, 2013.
- 2) R. Vedalakshmi, V. Saraswathy, H. W. Song, and N. Palaniswamy, (2009), Corros. Sci., 51, 1299.
- 3) Y. Hoshi, T. Koike, T. Okamoto, H. Tokieda, I. Shitanda, M. Itagaki, and Y. Kato, (2019), J. Electrochem. Soc., 166, C3316.
- 4) Y. Hoshi, C. Hasegawa, T. Okamoto, M. Soukura, H. Tokieda, I. Shitanda, M. Itagaki, and Y. Kato, (2019), Electrochemistry, 87, 78.
- 5) S. Feliu, J. A. Gonzalez, J. M. Miranda, and V. Feliu, (2005), Corros. Sci., 47, 217.
- 6) 金光俊徳, 佐藤真市, 高谷哲, 山本貴士: 完全非破壊による分極抵抗法の端子配置および測定結果の解釈方法の提案, コンクリート工学年次論文集 Vol.45, No.1, pp.694-699, 2023.
- 7) 橋本永手, 田中基, 金子泰明, 加藤佳孝: コンクリート中鉄筋との導通を要しないインピーダンススペクトルの把握手法, コンクリート工学年次論文集 Vol.43, No.1, pp.1211-1216, 2021.
- 8) 田中基, 橋本永手, 金子泰明, 加藤佳孝: コンクリート中鉄筋との導通を要しない腐食状態推定手法の検討, コンクリート工学年次論文集 43, pp.1229-1234, 2021.
- 9) Nagate Hashimoto, Motoki Tanaka, Yasuaki Kaneko, Yoshitaka Kato, Akinobu Hiramatsu: 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, Journal of Applied Electrochemistry, 53, pages1895-1909, 2023.