

コンクリート中鉄筋の腐食状態を非破壊で測定する「Dr.CORR」を研究開発

平間 昭信・橋本 永手・加藤 佳孝

一般的に、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、コンクリートをはつり出して鉄筋と測定機器を導通して確認する方法や、構造物からコンクリートを採取して中性化深さや塩化物量を測定して鉄筋の腐食状態を推定する方法がある。また、鉄筋の腐食状態を測定する場合、測定中はプローブを手で保持し続ける必要があり苦渋作業となっている。そこで、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行い、完全非破壊による鉄筋の腐食状態を把握できる方法を確立した。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、プローブの保持という苦渋作業の問題も解消した。

キーワード：鉄筋コンクリート構造物, 維持管理, 鉄筋腐食, 非破壊測定, 交流インピーダンス

1. はじめに

膨大な社会基盤施設を抱えるわが国において、その施設の多くを占めるコンクリート構造物については、劣化が顕在化している構造物も存在しており、その対策が急務である。コンクリート構造物の維持管理にか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対策をとることが有効であるとの認識が広まっており、法令においても2014年から知識と技能を有する者が5年に1度、近接目視を基本とする点検が行われている。この近接目視は、ひび割れなどの変状が顕在化したコンクリート構造物の健全度を把握するには有効であるが、変状が顕在化する前に対策を講じる必要がある場合には、近接目視の結果に基づいた診断では補修・補強の対応が遅れる可能性が想定される。

コンクリート構造物の劣化の一つとして塩害がある。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、鉄は表面に不動態皮膜を形成し、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速度は増大し、その鉄筋の腐食によってコンクリートにひび割れが発生する。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、腐食ひび割れ発生前に鉄筋の腐食を把握することが重要である。

このような社会背景を受けて、筆者らは、コンクリート中の鉄筋の腐食状態を非破壊で測定する方法について共同研究開発を進め、鉄筋腐食測定機「Dr.CORR」（以下、腐食測定機）による測定方法を確立した（写真—1）。その測定方法について、紹介する。

2. 本手法の概要

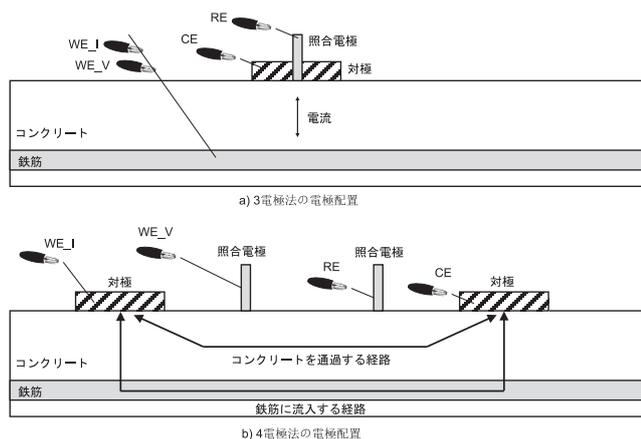
(1) 従来の測定方法

腐食状態を把握する測定方法として、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。図中のWE_V、WE_I、CE、REはポテンシオスタットの端子で、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



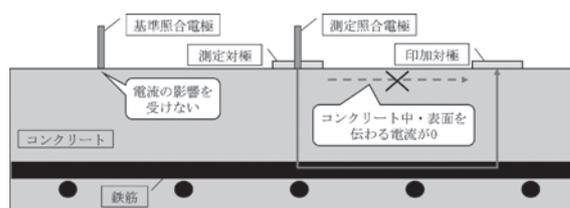
写真—1 鉄筋腐食測定機本体および測定プローブ



図一 3電極法と4電極法の一般的な電極配置

と照合電極を配置する。WE_V, WE_I, CE, RE をそれぞれ図一 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^{6)~8)}。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、コンクリート構造物の一部をはつり出す必要がある。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に扱うことができる。

図一 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 をそれぞれ図一 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、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、4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^{8)~10)}、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る。そのため、鉄筋に流入した電流を数値解析など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。



図一 2 本手法の電極配置

(2) 測定原理

筆者らが開発した手法^{11)~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。その測定原理を簡単に紹介する。詳細な測定原理は文献^{13)~15)}を参照されたい。

図一 2 に本手法の電極配置および概要を示す。コンクリート表面の測定点に対極および照合電極を設置し、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。図のように、測定照合電極と基準照合電極の電位差が規定量となるように対極間に電流を印加して、電流値を測定する。ここで重要となる要素は、①コンクリート中・表面を流れる電流が0であり、対極間に流れる電流がすべて鉄筋を流れること、②基準照合電極が対極間に流れる電流の影響を受けない、の2点である。そのため、測定対極-印加対極と、測定照合電極-基準照合電極の距離を十分に離す必要がある。

(3) 腐食測定機の特徴

本手法の主な特長は次の通りである。

- ・コンクリートをはつり出すことなく構造物中铁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するため、測定中はハンズフリーでの測定が可能である。
- ・パソコンやモバイルバッテリーから給電が可能であるため、大掛かりな電源装置が不要である。
- ・独自の電圧制御システムによってプローブ間に適切な電圧を印加することで、精度の高い測定が可能である。
- ・測定されたインピーダンスを解析し、鉄筋の腐食速度および腐食レベルを表示する。

(4) 本手法による測定方法

本手法による測定方法は次の通りである(図一 3)。

- ・測定対象鉄筋の直上に3つの測定プローブを設置する。

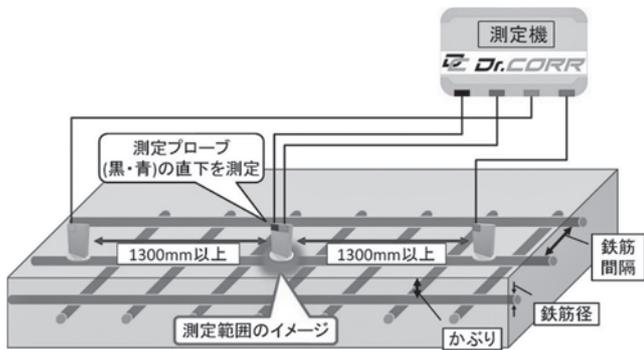


図-3 本手法による鉄筋腐食測定イメージ

- ・測定プローブは測定対象と導通している鉄筋上かつ、それぞれのプローブが直線距離で1,300 mm以上離れるように設置する。
- ・専用のソフトウェアによってインピーダンススペクトルを自動で取得、解析を行う。
- ・鉄筋かぶり、鉄筋径および鉄筋間隔を入力することで分極抵抗および腐食速度を推定する。

3. 鉄道高架橋補修工事での測定事例

測定精度の検証およびデータの蓄積を目的として、いくつかの補修工事現場にて測定を実施した。その一例として、鉄道高架橋補修工事での適用事例について紹介する(写真-2)。

(1) 従来方法(3電極法)との比較

鉄筋と測定機器を接続する従来の測定方法である3



写真-2 鉄道高架橋補修工事での測定状況

電極法と、本手法の測定結果を比較し、測定結果の精度を検証した。その測定結果を図-4に示す。図中にプロットされる半円を容量性半円と呼び、半円と実数部 $Re Z$ 軸との交点からなる直径が分極抵抗となる。どちらの方法でも、同程度の分極抵抗となり、同程度の精度を有することを確認した。

(2) 専用ソフトウェアによる腐食判定

測定結果の画面および測定箇所の鉄筋状態を図-5に示す。測定結果の画面に表示される判定レベルは5段階で表示され、腐食速度に応じて設定したレベルが表示される。なお、判定レベルの初期設定はCEB(ヨーロッパコンクリート委員会)の基準となっているが、任意での設定も可能である。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、腐食速度から判定されたレベルも鉄筋の状態と対応するものであった。また、測定中に鉄道車両が通過し、測定箇所が振動する状況であったが、粘着導電性ゲルの効果により、測定中にプローブが落下することはなかった。

4. おわりに

コンクリート構造物の劣化の中で最も深刻なのは鉄筋の腐食であるが、実構造物中の腐食の状況を把握することは極めて難しい。従来は鉄筋腐食の間接的な要因であるコンクリートの中性化の進行程度や、コンクリート中の塩化物イオン量を把握してきた。ただし、

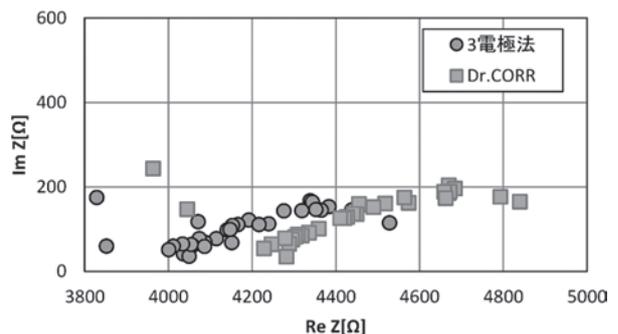


図-4 従来方法(3電極法)と腐食測定機の測定結果比較

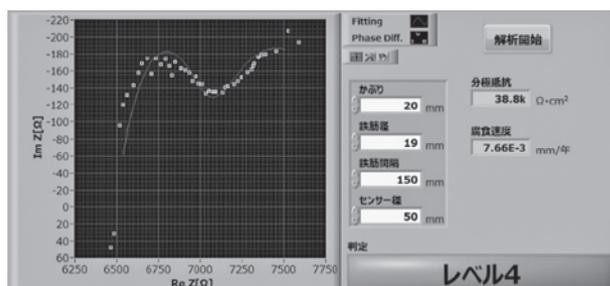


図-5 腐食測定画面および測定箇所の鉄筋

コンクリートの品質や構造物の立地環境によっては、コンクリート中の鉄筋の表面の塩化物イオン濃度が同一であっても、腐食する場合もあるし、腐食しない場合があるなど、これらの情報はあくまでも間接的な参考情報にしかなり得ない。その結果として、効果的かつ効率的な維持管理の実現が難しい状況にあった。なぜなら、個々の構造物のLCCを最小化するための対策の実施時期などが定まらないため、複数の構造物を管理するときに、LCCに基づいた対策等の実施の優先順位を定めることができず、現状では場当たりの維持管理にならざるを得ない状況にある。

このような現状に対して、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腐食を、完全非破壊で定量的に把握することができる。このため、この結果に基づき、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、従来に比べて飛躍的に実現性の高い維持管理計画を立案することが可能となる。加えて、従来方法では、はつり出しが必要であるのに対して完全非破壊となったことにより、はつり作業に伴う粉じんや汚水などの発生がなくなり作業環境は大きく改善される。また、ハンズフリーでの測定可能となり、上向きでプローブを保持し続けるという苦渋作業からも作業員は解放されることになる。結果として、作業の生産性向上および作業者の労働安全性を飛躍的に高めることにも貢献することができる技術である。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、調査方法は簡便であることが望ましい。本手法が調査のハードルを下げ、コンクリート構造物の効率的な維持管理の推進に貢献すれば何よりである。

謝 辞

本手法の開発、現場測定および展開に際して、クリアパルス(株)、エフティエス(株)、ならびに関係各位の皆様方からご協力を賜りましたことに対し、この誌面をお借りして厚くお礼申し上げます。

JCM A

《参考文献》

- 1) C. Andrade, L. Soler, C. Alonso, X. R. Novoa, and M. Keddum, (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) C. Andrade, M. Keddum, X. R. Novoa, M. C. Pérez, C. M. Rangel, and H. Takenouti, Electrochim. Acta, 46, 3905 (2001).
- 7) Y. S. Choi, J. G. Kim, and K. M. Lee, (2006), Corros. Sci., 48, 1733.
- 8) D. A. Koleva, K. van Breugel, J. H. W. de Wit, E. van Westing, N. Boshkov, and A. L. A. Fraaij, (2007), J. Electrochem. Soc., 154, E45.
- 9) C. Andrade, I. Martinez, and M. Castellote, (2008), J. Appl. Electrochem., 38, 1467.
- 10) M. Keddum, X. R. Novoa, and V. Vivier, (2009), Corros. Sci., 51, 1795.
- 11) 金子泰明, 橋本永手, 加藤佳孝: 交流インピーダンス法を用いた完全非破壊での腐食程度推定, 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 19, pp.397-400, 2019年10月
- 12) 加藤佳孝, 橋本永手, 金子泰明, 平間昭信: 電気化学手法を用いたコンクリート中鉄筋の腐食状況を把握する方法の提案, コンクリート工学 59 (5), pp.416-421, 2021年
- 13) 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 43, pp.1211-1216, 2021年7月
- 14) 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年7月
- 15) Nagate Hashimoto, Motoki Tanaka, Yasuaki Kaneko, Yoshitaka Kato, Akinobu Hiramata: 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年

【筆者紹介】

平間 昭信 (ひらま あきのぶ)
飛鳥建設(株)
土木本部 土木技術部
チーフエンジニア



橋本 永手 (はしもと ながて)
港湾空港技術研究所
構造研究領域材料研究グループ
研究官



加藤 佳孝 (かとう よしたか)
東京理科大学
創域理工学部 社会基盤工学科
教授

