

論文 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

橋本 永手*1・田中 基*2・金子 泰明*3・加藤 佳孝*4

要旨：コンクリート構造物中の鉄筋の腐食状態を把握する交流インピーダンス法は、コンクリート中の鉄筋との導通の確保が必要な場合が一般的である。本稿では、測定箇所に対極と照合電極を、測定箇所から140cm以上離れた箇所にもう一つの対極を、両対極からそれぞれ160cm以上離れた箇所にもう一つの照合電極を設置し、対極間に交流を印加した際の照合電極間の電位差測定を解析することで、鉄筋との導通を要せずに鉄筋のインピーダンススペクトルを取得する手法を提案した。検証実験で、本手法と導通を要する手法の出力を比較したところ、両者は同等であることがわかった。

キーワード：交流インピーダンス法、鉄筋腐食、対極、照合電極、非破壊検査

1. はじめに

コンクリート構造物中の鉄筋の腐食状態を把握する手法の一つに、交流インピーダンス法がある。交流インピーダンス法は、コンクリート表面に対極と呼ばれる金属を設置し、対極とコンクリート中鉄筋間に様々な周波数の交流を印加し、その電気的応答（インピーダンススペクトル）から腐食状態を把握する方法である。そのため、コンクリート構造物に交流インピーダンス法を適用する際には、鉄筋と対極との導通の確保が必要となり、利便性の面で障害となる場合がある。

このような背景の中、著者らはコンクリート中鉄筋の腐食状態を鉄筋との導通なしで把握する手法を検討してきた。本稿では、対極の設置箇所と電位差の計測箇所を工夫することで、コンクリート中鉄筋との導通を要せずに、コンクリート中鉄筋のインピーダンススペクトルを得る手法（以降、本手法とする）を提案する。また、数値実験および物理実験から本手法の妥当性を検討した。

2. 本手法の原理

本章では、本手法の出力が、一般的な導通を要する三電極交流インピーダンス法（以降、従来法）の出力と同じであることを証明する。2.1項では、従来法の原理の中で、本手法の原理の説明に必要な部分を抽出して説明する。また、説明に基づき、「インピーダンススペクトルを測定するために必要な測定条件」を整理する。2.2項では、本手法の原理を説明する。また、2.1項で整理した条件に基づき、本手法が「インピーダンススペクトルを測定するために必要な測定条件」を満たすこと、すなわち、本手法が従来法と同じインピーダンススペクトルを出力可能であることを説明する。

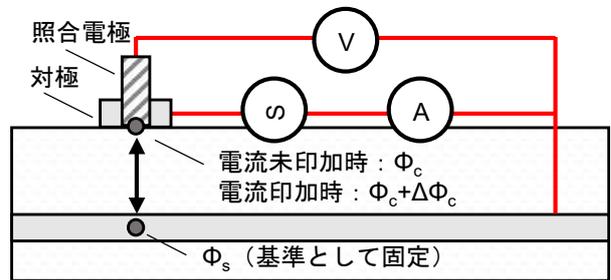


図-1 交流インピーダンス法（従来法）の概要

2.1 交流インピーダンス法の原理

想定する従来法の測定系は図-1の通りである。対極を測定箇所に設置し、対極と鉄筋間に様々な周波数の交流電流 $I[A]$ を印加する。照合電極を対極近傍に設置し、交流未印加時および印加時の電位差計の示す正弦波形を測定する。この際、電位差計の示す値 $V_{obs}[V]$ は、図中矢印に示した鉄筋の内部電位と照合電極設置箇所のコンクリートの内部電位の差および照合電極固有の電位差の和である。照合電極固有の電位差は同一温度下で一定の値となるため、照合電極種類を明記したうえで、計算上無視することが一般的である。本論文でも同様に、照合電極固有の電位差は計算上無視し、電位差計の示す値をコンクリートと照合電極間の電位差とした。

交流未印加時を考える。鉄筋の内部電位を $\Phi_s[V]$ 、測定箇所のコンクリートの内部電位を $\Phi_c[V]$ とすれば、測定電位差 $V_{obs,off}$ は式(1)の通りである。交流インピーダンス法では一般に Φ_c を基準にすることが多いが、本手法の原理の説明の上では、鉄筋の内部電位を基準とした。なお、電流と電位差の向きに注意すれば両者の物理的意味は同じである。

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（学生会員）

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科（学生会員）

*3 飛島建設（株）技術研究所技術開発グループ（正会員）

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博士（工学）（正会員）

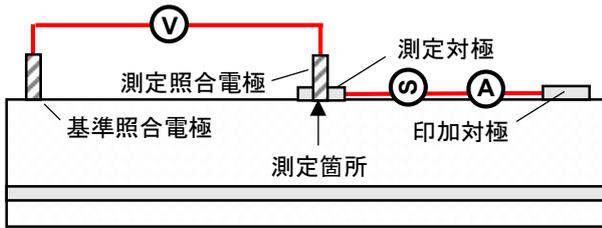


図-2 本手法の電極と対極の設置

$$V_{obs_off} = \Phi_c - \Phi_s \quad (1)$$

交流印加時を考える。交流印加によるコンクリート内部電位の変化量を $\Delta\Phi_c$ [V]とすれば、測定電位差 V_{obs_on} は式(2)の通りである。

$$V_{obs_on} = (\Phi_c + \Delta\Phi_c) - \Phi_s \quad (2)$$

V_{obs_on} と V_{obs_off} の差を取れば、次の通りである。

$$V_{obs_on} - V_{obs_off} = \Delta\Phi_c \quad (3)$$

従来法では、鉄筋と対極が導通していることからすべての電流が鉄筋に流入出する。したがって、この条件では、印加した電流が鉄筋に流入出した電流と等しいため、交流印加によるコンクリート内部電位の変化 $\Delta\Phi_c$ と印加した電流 I の比が、測定箇所と鉄筋間のインピーダンスとなる。同様に、様々な周波数で測定したインピーダンスが、インピーダンススペクトルとなる。

以上の原理から、「インピーダンススペクトルを測定するために必要な測定条件」は次の通りにまとめられる。

- ・すべての電流が鉄筋に流入出している。
- ・交流印加によるコンクリート内部電位の変化が測定可能である。

2.2 本手法の原理

2.2.1 本手法の各電極の配置

図-2は本手法の電極と対極の配置である。図中、矢印に示される箇所を測定箇所とする。測定箇所に対極と照合電極を1つずつ設置し、それぞれを測定対極、測定照合電極と呼ぶ。測定対極と離れた位置にも対極を設置し、印加対極と呼ぶ。さらに、両対極から離れた位置にも照合電極を設置し、基準照合電極と呼ぶ。

2.2.2 本手法が満たすべき条件

図-3に測定対極と印加対極間の等価回路を示した。この際、印加電流は鉄筋に流入出する電流と流入出しない電流を想定した。それぞれの電流経路を経路1、経路2とする。また、鉄筋に流入出する電流は、かぶりを介して鉄筋に流入出するとした。対極間の距離を L [m]、単位長さ当たりの鉄筋内部の抵抗値を R_s [Ω /m]、鉄筋の分極抵抗を R_s' [Ω]、対極の分極抵抗を R_{CE} [Ω]、単位長さ当たりのコンクリートの抵抗値を R_c [Ω /m]、コンクリート表面から鉄筋までの抵抗値を R_c' [Ω]、印加した電流を i [A]とする。経路1および経路2は並列回路であるから、回路両端にかかる電圧が等しいことに着目すれば、経路1を

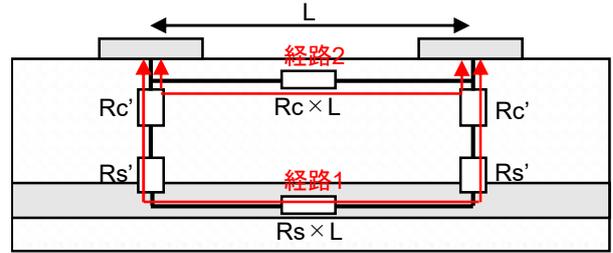


図-3 本手法の対極配置と対極間の等価回路

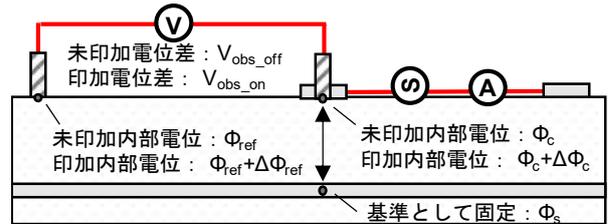


図-4 本手法で重要となる内部電位

流れる電流値 i_s [A]と経路2を流れる電流値 i_c [A]は次の通りである。なお、鉄筋に流入出する電流の傾向を把握することが目的であるから、式展開の簡単のため抵抗の複素数成分は無視した。

$$i_c \cdot (R_c \cdot L) + i \cdot R_{CE} \quad (4)$$

$$= i_s \cdot (R_s \cdot L + 2R_c' + 2R_s') + i \cdot R_{CE} \quad (5)$$

$$i = i_c + i_s \quad (5)$$

式(4)、(5)を連立して整理すれば次の通りである。

$$\frac{i}{i_s} = 1 + \left(\frac{R_s}{R_c} + \frac{2R_c' + 2R_s'}{R_c \cdot L} \right) \quad (6)$$

一般に、 R_s は R_c に比べ非常に小さいことを用いれば次の通り整理できる。

$$\frac{i}{i_s} = 1 + \frac{2R_c' + 2R_s'}{R_c \cdot L} \quad (7)$$

ここで、対極間距離を十分に離し、 L が十分に大きい状況を想定すれば i/i_s は1となり、すべての電流が鉄筋に流れることがわかる。この妥当性は3章以降に記した。

次に、基準照合電極を両対極から離れた位置に適切に設置すれば、2.1節で示した「交流印加によるコンクリート内部電位の変化が測定可能である」を満たすことを説明する。図-4に各電極の設置位置と各位置での内部電位を記載した。ここで、基準照合電極は、両対極から十分離れており、印加電流の届かない箇所に設置する。2.1節と同様に、測定照合電極を設置した箇所のコンクリートの内部電位を Φ_c 、鉄筋の内部電位を Φ_s とする。また、基準照合電極を設置した箇所のコンクリートの内部電位を Φ_{ref} [V]とする。

交流未印加時を考える。交流未印加時の測定電位差 V_{obs_off} は次の通りである。

$$V_{obs_off} = \Phi_c - \Phi_{ref} \quad (8)$$

次に、交流印加時を考える。交流印加による、基準照合電極を設置した箇所のコンクリート内部電位の変化量を $\Delta\Phi_{ref}$ [V]とすれば、交流印加時の測定電位差 $V_{obs,on}$ は次の通りである。

$$V_{obs,on} = (\Phi_c + \Delta\Phi_c) - (\Phi_{ref} + \Delta\Phi_{ref}) \quad (9)$$

ここに、基準照合電極を印加電流の届かない箇所に設置すれば、 $\Delta\Phi_{ref}$ は非常に小さな値となることから次の通り整理できる。

$$V_{obs,on} = (\Phi_c + \Delta\Phi_c) - \Phi_{ref} \quad (10)$$

$V_{obs,on}$ と $V_{obs,off}$ の差を取れば、次の通りである。

$$V_{obs,on} - V_{obs,off} = \Delta\Phi_c \quad (11)$$

式(3)と式(11)が同じ式であることは、本手法で得られた $\Delta\Phi_c$ が、2.1節で想定した交流インピーダンス法で得られる $\Delta\Phi_c$ と同じ意味を持つ物理量であることの裏付けになると考えられる。

本節をまとめると次の通りである。

- ・測定対極および印加対極を適切な距離に設定することで、すべての電流が鉄筋に流入出する。
- ・基準照合電極を印加電流の流入出しない箇所に設置することで交流印加によるコンクリート内部電位の変化が測定可能である。

上記条件を満たした場合の電流計および電位差計の示す値はそれぞれ、鉄筋に流入出した電流および測定箇所のコンクリートと鉄筋内部の内部電位差であるから、 $\Delta\Phi_c$ と I の比がコンクリートと鉄筋間のインピーダンスとなる。

3. 測定条件の確認のための数値実験

ここでは、2.2.2項で説明した条件を数値実験で確認した。

3.1 数値実験共通条件

R^3 空間内のある領域を Ω とする。 Ω の境界を Γ とする。 Γ 上のある範囲から角周波数 ω [rad/s]の電流 $I(\mathbf{x}, t) = I_0(\mathbf{x}) \cdot e^{j\omega t}$ [A]が流入出することを考える。ここに、 j は虚数単位である。これに伴う Ω の内部電位分布 $\varphi(\mathbf{x})$ [V]は次の方程式で支配される。詳細な導出は既報¹⁾に述べた。

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) = 0 \quad (12)$$

$$\gamma(\mathbf{x}, \omega) \equiv j\omega\epsilon(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x}) \quad (13)$$

ここに、 γ は複素導電率[1/Ω]、 ϵ は誘電率[F/m]、 σ は導電率[1/Ω]である。ただし、ノイマン境界条件は次の通りである。

$$\gamma \nabla \varphi \cdot \mathbf{n} = I_0 \text{ on } \Gamma \quad (14)$$

ここに、 \mathbf{n} は境界 Γ の法線ベクトルである。

上記支配方程式を用い、有限要素法解析で数値実験した。図-5に想定する鉄筋コンクリートを図示した。以降、座標は図中の座標軸に従うものとし、例えば、 $x=100\text{mm}$ 、 $y=110\text{mm}$ 、 $z=120\text{mm}$ の地点を(100,110,120)のように表記する。想定する鉄筋コンクリートの寸法は

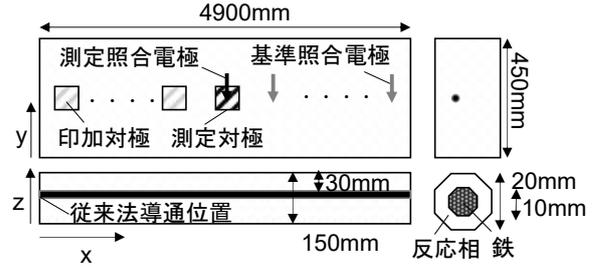


図-5 数値実験で想定した鉄筋コンクリート

450×4900×150mm でかぶりが 30mm となるように、中央に 1 本配筋した。鉄筋全面が腐食している腐食試験体と、鉄筋全面が腐食していない健全試験体を対象とした。コンクリートの複素導電率は $2.82 \times 10^{-4} + 9.50 \times 10^{-12} j\omega$ [S/cm]¹⁾、鉄筋は高さ 20mm の正八角形とし、鉄の複素導電率は $1.00 \times 10^8 + 1.00 \times 10^{-3} j\omega$ [S/cm]²⁾とした。鉄筋表面 5mm を反応層とし、腐食鉄筋であれば反応相の複素導電率は $9.80 \times 10^{-3} + 1.83 \times 10^{-3} j\omega$ [S/cm]³⁾、健全鉄筋であれば反応相の複素導電率は $1.85 \times 10^{-5} + 2.33 \times 10^{-5} j\omega$ [S/cm]³⁾とした。印加電流は振幅 0.1mA で、対極の大きさは 50mm×50mm とした。

3.2 電流分布に関する検討

本検討では、測定対極を(2450,225,150)に固定し、印加対極を(2250,225,150)、(1850,225,150)・・・(50,225,150)のように x 軸方向に-400mm ずつ移動させ、鉄筋内部を流れる電流を算出した。なお、比較のため従来法で鉄筋内部を流れる電流も計算し併記した。なお、従来法の導通位置は(0,225,110)とした。検討した周波数は現実的な測定の範囲で 100Hz および 100mHz とした。なお、本検討は電流に関する検討であるため、基準照合電極の配置は考慮していない。

図-6は腐食試験体の結果である。グラフの凡例は印加対極の x 座標を示している。縦軸は鉄筋内部を流れる電流の絶対値である。印加対極の x 座標が 1250 以下 (対極間距離 1200mm 以上) の対極間距離が遠い場合では、鉄筋内部を流れる電流の最大値は、周波数に関わらず、0.1mA を示し、すべての電流が鉄筋に流入出したと考えられる。

図-6を x 軸方向に中央差分した結果が図-7である。グラフの凡例は印加対極の x 座標を示している。図-7の縦軸は x 軸方向に微小区間移動した際の鉄筋を流れる電流の変化量であり、鉄筋に流入出する電流はかぶりを介して鉄筋に流入出する電流であるから、x 方向の微小区間でコンクリートから鉄筋に流入出した電流と解釈できる。図-7の測定対極付近 (x=2450) に着目する。印加対極の x 座標が 1250 以下 (対極間距離 1200mm 以上) の対極間距離が遠い場合、本手法で鉄筋に流入出する電流分布は従来法で流入出する電流分布と同様の概形である

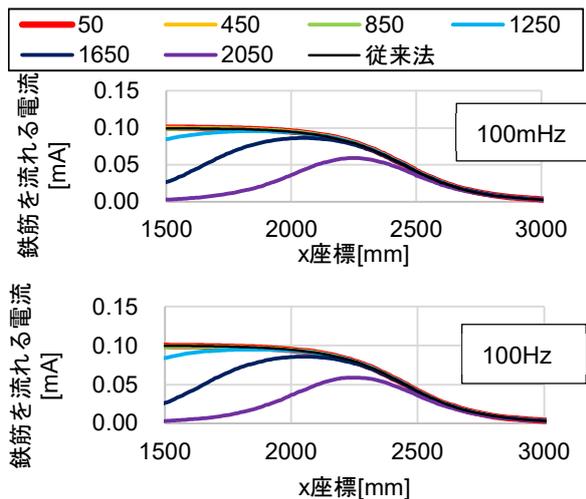


図-6 鉄筋を流れる電流（腐食試験体）

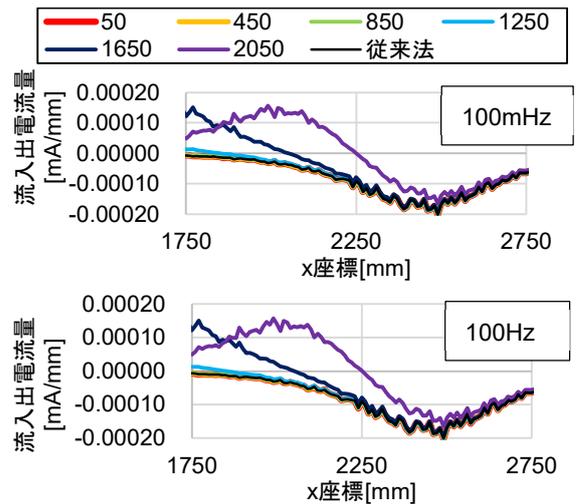


図-7 鉄筋に流入する電流（腐食試験体）

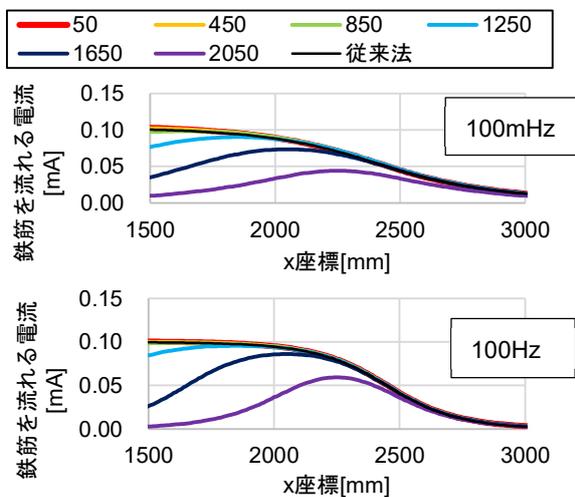


図-8 鉄筋を流れる電流（健全試験体）

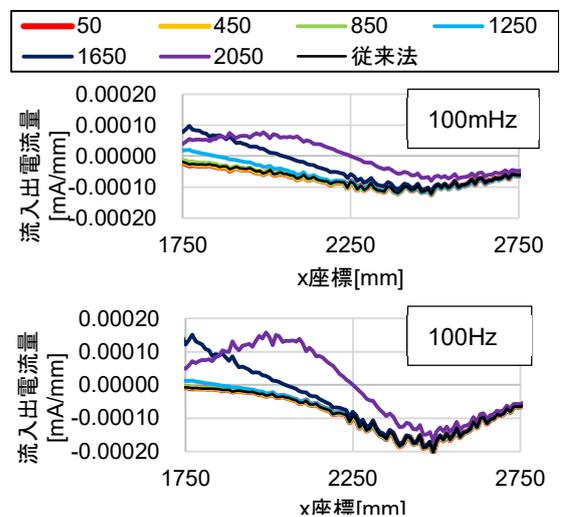


図-9 鉄筋に流入する電流（健全試験体）

ことが示された。

図-8 は健全試験体の場合の鉄筋内部を流れる電流である。グラフの軸設定は図-6 と同じである。印加対極の x 座標が 850 以下（対極間距離 1600mm 以上）の対極間距離が遠い場合には、鉄筋内部を流れる電流の最大値は、0.1mA を示し、すべての電流が鉄筋に流入したと考えられる。健全試験体では、特に低周波数の電流が印加された場合に、より広い範囲の鉄筋に小さな電流が流入する傾向を示し、鉄筋内部を流れる電流が 0.1mA となるためには、腐食鉄筋の場合よりも対極間距離を離す必要があることが示された。

図-8 を x 軸方向に中央差分した結果が図-9 である。図-9 の測定対極付近に着目する。印加対極の x 座標が 850 以下（対極間距離 1600mm 以上）の対極間距離が遠い場合、本手法で鉄筋に流入する電流分布は従来法で流出する電流分布と同様の概形であることが示された。

本数値実験により、対極間距離を十分に離すことで全ての電流を鉄筋に流入させることが可能であることが示されたが、結果は一例であり、配筋やかぶりの電気伝

導度、鉄筋の分極抵抗により異なる結果は異なると考えられる。今後、多くの実験を重ねることで、対極間距離の具体値を設定する必要がある。

3.3 測定電位差に関する検討

本検討では、測定対極を(2450,225,150)に固定し、鉄筋と測定対極間に交流電流を印加した。印加対極を用いない理由は基準照合電極の設置位置にのみ検討要素を絞るためである。基準照合電極を(2850,225,150)、(3250,225,150)…(4850,225,150)のように x 軸方向に 400mm ずつ離れた場合の基準照合電極設置箇所のコンクリートの内部電位と鉄筋内の内部電位の差（以降、基準・鉄筋内部電位差とする）を算定した。なお、比較のため測定照合電極設置箇所のコンクリートの内部電位と鉄筋内の内部電位の差（以降、測定・鉄筋内部電位差とする）も計算し併記した。電流の正負は x 軸の方向を正とした。検討した周波数は現実的な測定の範囲で 100mHz~100Hz とした。

図-10 は腐食試験体の基準・鉄筋内部電位差の計算結果である。グラフの凡例は基準照合電極の x 座標を示し

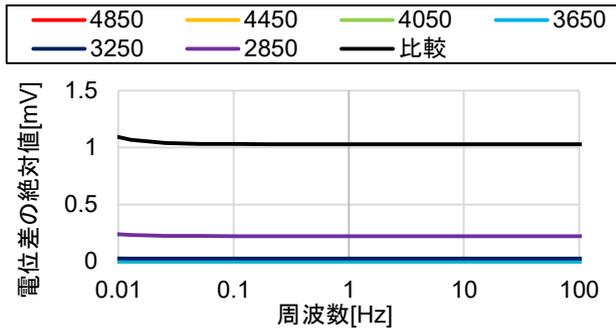


図-10 基準照合電極・鉄筋内電位差（腐食試験体）

ている。なお、凡例の「比較」は測定・鉄筋内部電位差である。基準・鉄筋内部電位差は式(11)中の $\Delta\Phi_{ref}$ に相当する内部電位変化であるから、基準・鉄筋内部電位差が「比較」よりも十分小さいことが本手法の満たすべき条件である。基準照合電極の x 座標が 3250mm 以上（測定対極・基準照合電極間距離 800mm 以上）の場合、基準・鉄筋内部電位差が「比較」に比べて小さくなる傾向が示された。したがって、本結果から基準照合電極が測定対極から遠い場合、 Φ_{ref} が印加電流により変化しないことが示された。

図-11 は健全試験体の基準・鉄筋内部電位差の計算結果である。凡例の設定は図-10 と同じである。基準照合電極の x 座標が 4050 以上（測定対極・基準照合電極間距離 1600mm 以上）の場合、基準・鉄筋内部電位差が測定・鉄筋内部電位差に比べて小さくなることが示された。本結果から基準照合電極が測定対極から遠い場合、 Φ_{ref} が印加電流により変化しないことが示された。

本数値実験により、測定対極と基準照合電極を十分に離すことで、基準照合電極と測定照合電極の電位差は測定・鉄筋内部電位差と同じ値を示すことが示された。なお本節では、印加電極を用いていないが、印加対極を用いる場合には、印加電極と基準電極も十分に離す必要がある。また、本結果の測定対極と基準照合電極距離の具体値は一例であり、配筋やかぶりの電気伝導度、鉄筋の分極抵抗により結果は異なると思われる。今後、多くの実験を重ねることで、測定対極と基準照合電極距離の具体値を設定する必要がある。

4. 本手法の実現可能性の検討

本章では、2, 3 章で確認した条件を満たすことで、本手法で得られるインピーダンススペクトルと、従来法で得られるインピーダンススペクトルが一致することを数値実験および物理実験で確認した。

4.1 数値実験概要および結果

数値実験の詳細の設定は 3 章と同様である。本検討では測定対極を(2450,225,150)に、印加対極を(50,225,150)に設置し、交流電流を印加した。交流電流の周波数は現実

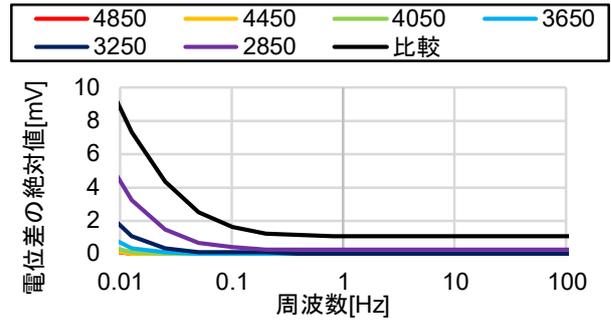


図-11 基準照合電極・鉄筋内電位差（健全試験体）

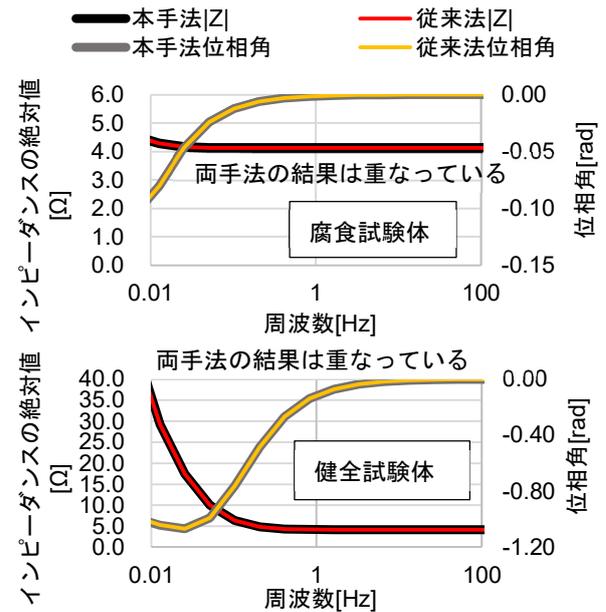


図-12 本手法のインピーダンス（数値実験）

的な測定の範囲で 100mHz~100Hz とした。また、基準照合電極は(4850,225,150)に測定照合電極は(2450,225,150)に設置し、交流印加時の基準照合電極、測定照合電極間の電位差を取得した。得られた電位差を印加電流で除すことで 2.2.2 に示したインピーダンスを得た。また、比較のため従来法の場合のインピーダンススペクトルも併記した。従来法の対極および照合電極は(2450,225,150)に設置し、鉄筋対極間に交流を印加した。交流印加時の鉄筋・測定照合電極間の電位差を測定し、印加電流で除すことでインピーダンスを得た。図-12 が数値実験結果である。本手法で得られたインピーダンスと従来法で得られたインピーダンスの概形は一致した。

4.2 物理実験概要および結果

鉄筋を埋設したコンクリート試験体を用い、本手法の適用性を検討した。試験体の寸法は 1600mm×1600mm×100mm、第一鉄筋のかぶりが 50mm、第二鉄筋のかぶりが 69mm となるように、100mm 間隔で計 30 本配筋した。図-13 に対極等の設置位置を示す。鉄筋を全面腐食させた腐食試験体と鉄筋が腐食していない健全試験体の二種類を測定した。どちらの試験体にも、φ19 の磨き丸鋼を

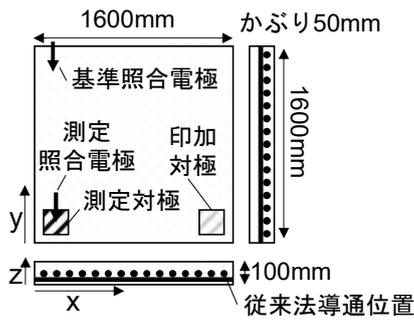


図-13 物理実験の試験体概要

使用し、腐食試験体の鉄筋は10%の塩化ナトリウム水溶液を噴霧してあらかじめ表面を腐食させた。また、コンクリートの水セメント比は54%で、腐食試験体には1m³あたり10kgの塩化ナトリウムを添加した。対極は導電性ゲルを用いて試験体に設置した。

本検討では測定対極を(160,160,100)に、印加対極を(1440,160,100)に設置し、交流電流を印加した。交流電流の周波数は100mHz~100Hzとした。また、基準照合電極は(160,1440,100)に測定照合電極は(160,160,100)に設置し、交流印加時の基準照合電極、測定照合電極間の電位差を測定した。得られた電位差を印加電流で除すことで、2.2.2に示したインピーダンスを得た。また、従来法の場合のインピーダンスも測定し併記した。従来法の対極および照合電極は(160,160,100)に設置し、鉄筋対極間に交流を印加した。交流印加時の鉄筋・照合電極間の電位差を測定し、印加電流で除すことでインピーダンスを得た。図-14が実験結果である。本手法で得られたインピーダンスと従来法で得られたインピーダンスの概形は一致した。両手法によるスペクトルともに高周波数領域では、腐食鉄筋、健全鉄筋ともに小さなインピーダンスを示し、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健全鉄筋の方が腐食鉄筋に比べ大きかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見は次の通りである。

- 1) 測定箇所に対極と照合電極を、測定箇所から1600mm以上離れた箇所にもう一つの対極を、両対極からそれぞれ1600mm以上離れた箇所にもう一つの照合電極を設置し、対極間に交流を印加した際の照合電極間の電位差測定を解析することで、鉄筋と

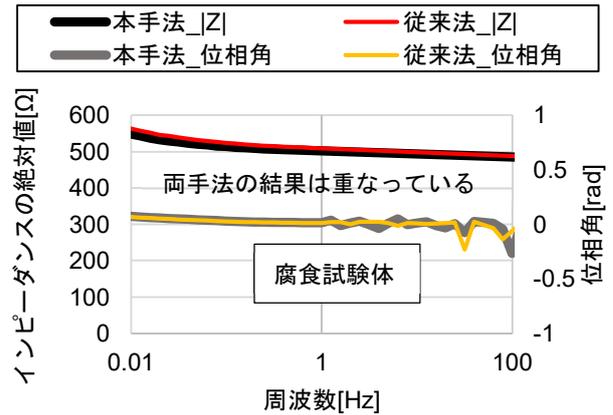
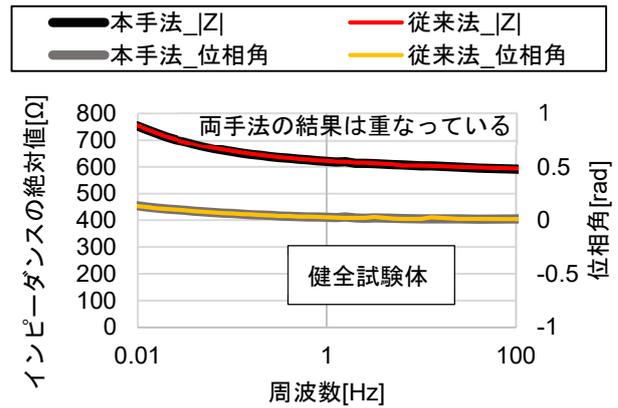


図-14 本手法のインピーダンス（物理実験）

の導通確保を要せずとも、鉄筋のインピーダンススペクトルが取得可能である。

- 2) 数値実験と物理実験で、本手法と導通を要する手法（従来法）で得たスペクトルを比較したところ概ね一致した。

謝辞: 本研究の一部はJSPS 科研費 JP19J14403, 19H02218 およびSCOPE 第19-1号の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) Keddad, M. et al.: Impedance measurements on cement paste, Cement and Concrete Research, vol.27, Issue8, pp.1191-1201, 1997
- 2) 砂川重信: 理論電磁気学, 紀伊国屋書店, p.169, 1999
- 3) Shi, J. et al.: Long-Term Electrochemical Behavior of Low-Alloy Steel in Simulated Concrete Pore Solution with Chlorides, Journal of Materials in Civil Engineering, vol.30, Issue 4, paper number 04018042, 2018