

論文 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

金光 俊徳*1・小野 新平*2

要旨: 近年の RC 構造物の老朽化に伴い、腐食発生および進行程度を早期に検知できる非破壊検査法が求められている。本論文では、構造物表面から非破壊で内部鉄筋の腐食進行速度を定量的に評価する四端子交流インピーダンス法を提案し、小型モルタル試験体に対して適用した。その結果、本手法により求まるインピーダンス性状は、従来の三電極によるものと同様の周波数依存性を示し、鉄筋表面の分極抵抗に換算できる指標を算出できることが明らかとなった。さらに、計測端子間隔や鉄筋量を変化させた条件下での計測から、適切な腐食指標の単位量を設定でき、定量的な腐食速度評価法として用いることができることを示した。

キーワード: 交流インピーダンス法, 四端子計測, 非破壊検査, 腐食速度, 鉄筋腐食

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物の老朽化が進行しており、近い将来、補修、補強、取替物量が増大し、対策が追いつかなくなることが予想されている。そこで、予防保全的な維持管理として早期検知、早期対策を行い、物量を平準化することが求められる。特に着目すべき経年劣化は鉄筋腐食であり、腐食進行に伴って鉄筋が膨張することでかぶりコンクリートの浮きやはく落を引き起こし、第三者被害を招く恐れがある。腐食は、ひび割れ発生などで表面に顕在化する前から内部で進行しており、非破壊検査法を用いることでその進行程度を早期に捉え、対策の要否を検討し判断することが重要である。

1.2 既往の腐食診断法

最近では、多くの非破壊腐食診断法が提案されている。鉄筋の腐食程度を推定する手法としては、電磁波レーダ法による鉄筋径推定¹⁾、超音波の伝播速度を用いる手法²⁾などが挙げられる。しかし、これらの手法は現在の腐食量がわかるのみで、腐食進行の予測を行うことが困難であるという課題がある。腐食による経年劣化の将来予測を行うためには、腐食進行速度の算出が必要である。

腐食進行速度を把握しグレーディングできる手法として、腐食が電気化学的反応であることに基づいた自然電位法³⁾、分極抵抗法⁴⁾などがある。現状では、これらは完全に非破壊ではなく、孔を空けて鉄筋を一部露出させる必要がある。孔を埋めた場合でも環境によっては埋め戻し箇所が弱点部となる恐れがあるため、構造物表面から非破壊で腐食速度を算出する手法が求められる。

1.3 研究目的

本研究では、コンクリート構造物を全く壊さず表面か

ら非破壊で内部鉄筋の腐食速度を算出できる手法として、四端子交流インピーダンス法(以降、四端子法と称する)を提案した。モルタル試験体に対して、本手法を用いた計測を行うことにより、非破壊腐食診断手法としての適用性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 四端子交流インピーダンス法の概要

四端子法は、分極抵抗法の1つである交流インピーダンス法を対象表面に置いた4個の端子で行う手法である。Stern and Geary の理論⁵⁾では、鉄筋の単位表面積当たりの分極抵抗 $R_p(k\Omega \cdot cm^2)$ が以下の式(1)で示されるように腐食電流密度に反比例するとされている。

$$I_{corr} = K \cdot \frac{1}{R_p} = K \cdot \frac{1}{R'_p \cdot A} \quad (1)$$

ここで、 I_{corr} : 腐食電流密度($\mu A/cm^2$)、 K : 換算係数 K 値(mV)(20~40mV 程度)、 R_p : 単位面積あたりの分極抵抗 ($k\Omega \cdot cm^2$)、 R'_p : 分極抵抗の計測値($k\Omega$)、 A : 被測定面積 (cm^2)である。腐食電流密度は、鉄が2価の陽イオンとなり電子を出す半反応式を仮定して腐食速度に換算できる。

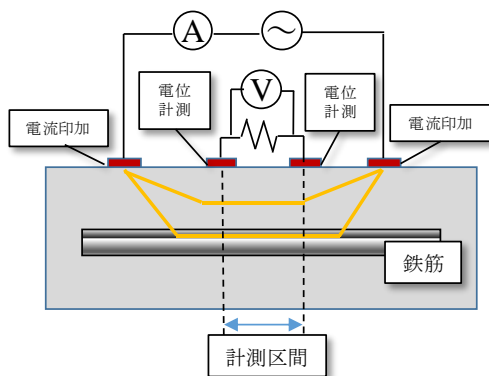
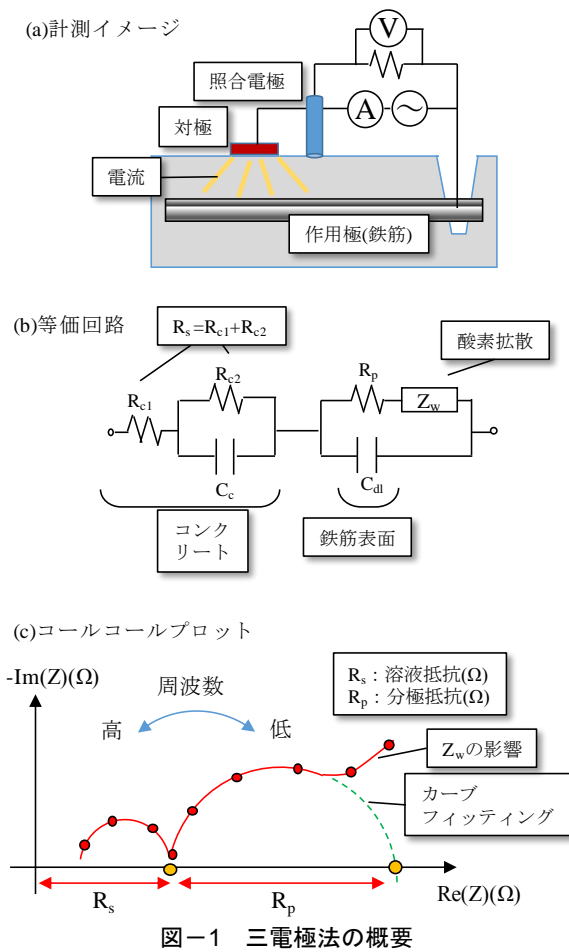
三電極法(従来法)の概要を図-1に、四端子法の概要を図-2に示す。三電極法は内部鉄筋にリード線の一部導通し、鉄筋-対極間の電流印加および鉄筋-照合電極間の電位差計測からインピーダンスを計測する手法である。コンクリート中の鉄筋に関する等価回路は図-1(b)のように解釈するのが妥当であると考えられる⁶⁾。コンクリート側は福山ら^{7,8)}が、セメントペースト自身や粗骨材との界面に電気容量があり、周波数に応じてインピーダンスが変化することを示している。鉄筋側は、鉄筋とコンクリートの界面に電荷の分離が生じコンデンサと抵抗の並列回路が形成される。また、表面の電荷移動よりコ

*1 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所 工修 (正会員)

*2 (一財)電力中央研究所 材料科学研究所 理博

ンクリート中の拡散による酸素到達が遅い拡散律速になった場合、ワールブルグインピーダンス Z_w が卓越する。以上のことから、コールコールプロットは図-1(c)のように表される。このプロットから、低周波数側で現れる鉄筋-コンクリート界面性状を表す半円のカーブフィッティングを行い、 R_p を求める手法を交流インピーダンス法と言う。

一方、四端子交流インピーダンス法は表面に等間隔に置いた4個の端子を用いて、外側の2端子から電流を印加し、内側の2端子間の電位差を計測することで、インピーダンス性状を算出する手法である。このような配置

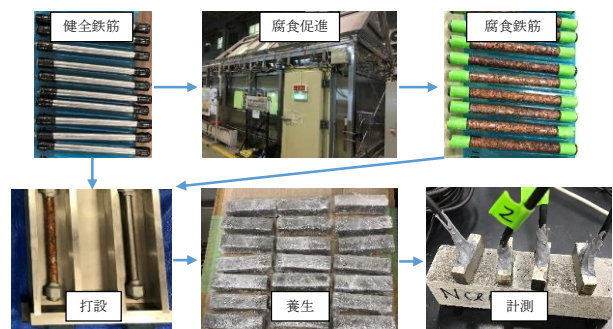
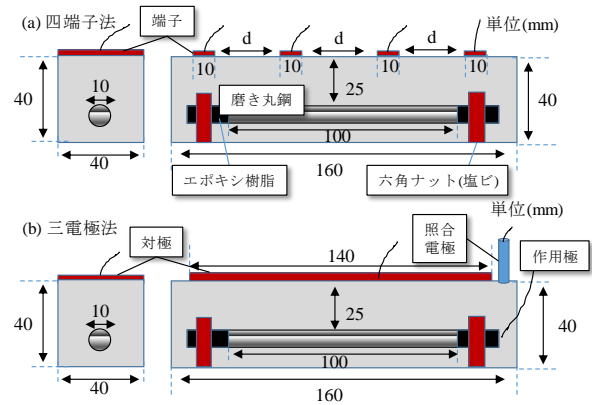


は、ウェンナー配置と呼ばれる。この手法の利点として、内部鉄筋への導通が必要ないこと、計測区間が内側の2端子の間隔と決まっていることが挙げられる。

2.2 試験体概要

計測対象となる試験体として、内部鉄筋の有無、腐食程度、含有塩化物イオン濃度(塩分濃度)を要因とした小型モルタルを用いた。試験体の概要を図-3に示す。試験体は $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ とし、鉄筋は $\phi 10$ で長さ 140mm の磨き丸鋼(SS400)を用い、両端から 20mm ずつエポキシ樹脂で被覆することで中央の 100mm を試験区間とした。スペイサーとして内径 12mm の塩化ビニル製六角ナットを用いてかぶりを確保した。

次に、実験準備・計測の様子を図-4に示す。埋設する鉄筋に関して、健全鉄筋は打設前にアセトンで表面の油を落とし、腐食鉄筋は、 $40^\circ\text{C}80\%RH$ で、1日1回5分間、 $3\%NaCl$ 水溶液の噴霧を行う環境負荷装置内に2週間暴露して腐食を促進させた。試験区間全面が腐食するように暴露3日目に暴露面の上下を反転させ、腐食後は図-4の右上写真に示すようにほぼ全面に赤さびを主としたさびが定着した。打設前に三電極法による比較用のケーブルを鉄筋端部に導通した。打設後は $20^\circ\text{C}70\%RH$ 下で2週間の封かん養生を行い、その後取り出して計測を行った。また、試験体の配合を表-1に、要因を表-2に示す。試験体の配合は、 $W/C=55(\%)$ 、 $C:S=1:3$ モルタルとし、塩分濃度が要因に応じて $0, 3, 10(\text{kg}/\text{m}^3)$ となるよう



に NaCl を練り混ぜた。試験体名は、(鉄筋)-CL(塩分濃度)-(番号)とし、鉄筋名は N が鉄筋なし、S が健全鉄筋、Cor が腐食鉄筋とした。

2.3 計測概要

四端子法計測は図-3(a)に示す配置で行い、端子には 10mm×40mm×20mm のステンレス片(SUS404)を用い、10mm×40mm の面をモルタル表面との接触面とした。ステンレス片を用いた理由は、安価である上、腐食しにくく電位が安定するためである。計測条件は、端子間隔 $d=30(\text{mm})$ 、印加電位差 $\Delta V=30(\text{mV})$ 、周波数 100kHz-1Hz で高周波から低周波への走査とした。端子間隔は、鉄筋の試験区間を考慮して、できる限り大きい間隔とした。電流印加は電位差制御とし、FRA(周波数応答解析器)付きのポテンショスタットを用いた。端子とモルタル表面の接触には、導電性のハイドロゲルシートを用いた。比較のため、三電極法の計測も図-3(b)に示す配置で行った。対極は 40mm×140mm×2mm のステンレス板(SUS404)、照合電極は鉛照合電極(PRE)を用いた。三電極法の計測条件は $\Delta V=30(\text{mV})$ 、周波数 100kHz-10mHz である。また、事前に高周波容量水分計を用いて、モルタルの含水率を計測したところ、5~6%の値を示した。この範囲では分極抵抗などの実験結果との相関は見られなかったが、今後、含水率が大きく異なる場合は検討する必要がある。

3. 実験結果

3.1 インピーダンスの周波数依存性

計測結果の内、要因ごとのコールコールプロット、および周波数とインピーダンスの実数値(Real(Z)とする)の

関係をまとめたものを図-5 に示す。まず内部鉄筋がない場合はコールコールプロットにおいて 1-100Hz までほぼ変化がなく 1 箇所にとどまり、Real(Z)は全周波数域でほぼ変化がなかった。これは、モルタルのみの場合は低周波数で応答する容量性成分がないことを示しており、既往研究⁹⁾と同様の傾向であった。一方、鉄筋がある場合は、三電極法で計測した既往研究⁶⁾と同様に図-1(c)に

表-1 試験体配合

試験体名	単位量(kg/m ³)			
	水	セメント	細骨材	塩化ナトリウム
	W	C	S	NaCl
N,S,Cor-CL0	292	530	1590	0
N,S,Cor-CL3	292	530	1585	4.8
N,S,Cor-CL10	292	530	1574	16

表-2 試験体要因

試験体名	鉄筋の有無	事前腐食期間(日)	含有Cl ⁻ 濃度(kg/m ³)	試験体数
N-CL0	無	-	0	2
N-CL3			3	2
N-CL10			10	2
S-CL0	有	0	0	2
S-CL3			3	2
S-CL10			10	2
Cor-CL0		14	0	2
Cor-CL3			3	2
Cor-CL10			10	2

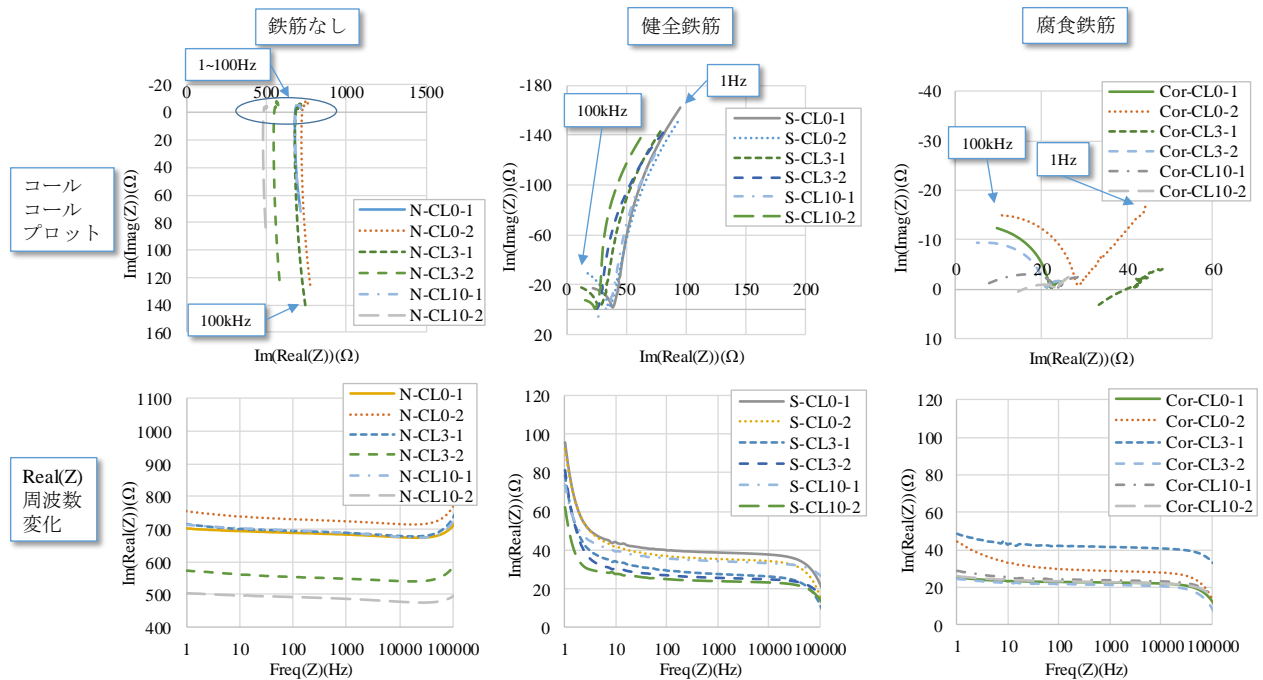


図-5 要因ごとのコールコールプロット、インピーダンスの周波数依存性の計測結果

示す高周波数側の半円と低周波数側の半円の一部を表しているような形状が見られた。さらに健全鉄筋、腐食鉄筋ともに 1-10Hz 程度の周波数域で $\text{Real}(Z)$ が増大した。これは、図-1(b)の鉄筋側の等価回路で表現されるような抵抗とコンデンサの並列回路の挙動を示していると考えられる。特に健全鉄筋の場合は腐食鉄筋に比べ $\text{Real}(Z)$ の変化量が大きかった。このような周波数変化は、内部鉄筋がない場合には見られなかったことから、印加電流が鉄筋を経由する場合に特有の応答性状であると考えられる。さらに、鉄筋の腐食状態により変化が見られたことから、三電極法と同様に低周波側の半円のカーブフィッティングを行うことで、内部鉄筋表面の腐食速度の指標やモルタルの電気的性質を定量的に算出できる可能性がある。そこで、四端子法で計測されたコールコールプロットにおいて、カーブフィッティングにより求まる半円と実数軸の 2 つの交点間の長さを端子間分極抵抗 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ 、半円と実数軸の交点の内、低い方の交点の値を端子間溶液抵抗 $R'_{s\text{-four}}(\Omega)$ と定義した。

3.2 塩分濃度、鉄筋有無による端子間溶液抵抗変化

要因ごとに算出した塩分濃度と $R'_{s\text{-four}}(\Omega)$ の関係を図-6 に示す。 $R'_{s\text{-four}}(\Omega)$ は、鉄筋ありの要因は図-1(c)に示すような半円のカーブフィッティングから求め、鉄筋なしの要因は代表値として 100(Hz) 時の $\text{Real}(Z)(\Omega)$ とした。結果として、鉄筋なしの要因は、鉄筋ありの要因と比較して、塩分濃度の大小によらず 10 倍以上大きな値を示した。これは、鉄筋がない場合には計測区間全体でモルタルの溶液抵抗が影響する一方、鉄筋がある場合には印加電流の一部が優先的に鉄筋内部に流れ、その分の抵抗が極めて小さくなるためと考えられる(鉄筋の電気抵抗率は $10^{-7}(\Omega \cdot \text{m})$ 程度)。したがって、このような溶液抵抗変化がある場合は鉄筋表面を経由しており、より低周波数域のインピーダンスを計測することにより端子間分極抵抗 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ を計測できると考えられる。

3.3 塩分濃度、鉄筋腐食による端子間分極抵抗変化

健全鉄筋と腐食鉄筋の要因ごとの塩分濃度と、低周波側の円弧のカーブフィッティングにより算出した $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ の関係を図-7 に示す。健全と腐食で値が大きく異なっており、腐食発生の有無および定量的な腐食速度を算出できる可能性がある。塩分濃度による相違点としては、健全鉄筋は塩分濃度が大きくなるほど $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ が小さくなった。これは、含有塩分濃度が 3,10(kg/m^3)の場合には腐食が発生し始めたことを反映していると考えられる。一方、腐食鉄筋の要因は塩分濃度の相違による変化が小さかった。

3.4 四端子法と三電極法の比較

四端子法の $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ と三電極法の $R'_p(\Omega)$ の比較を行った。これらの値の比較結果、および全算出値に対して切

片を 0 とした最小二乗法による線形回帰直線とその式を図-8 に示す。この図から、四端子法により求まる端子間分極抵抗 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ は三電極法による分極抵抗 $R'_p(\Omega)$ と線形関係にあり、同様の増減傾向にあることがわかる。このことは、四端子法が非破壊であるにも関わらず、 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ を算出すれば、既設構造物に対して一部破壊が必要な三電極法と同様に腐食速度を算出できるということである。三電極法と四端子法の値の違いに関しては、三電極法は鉄筋表面の分極抵抗を直接計測しているのに対

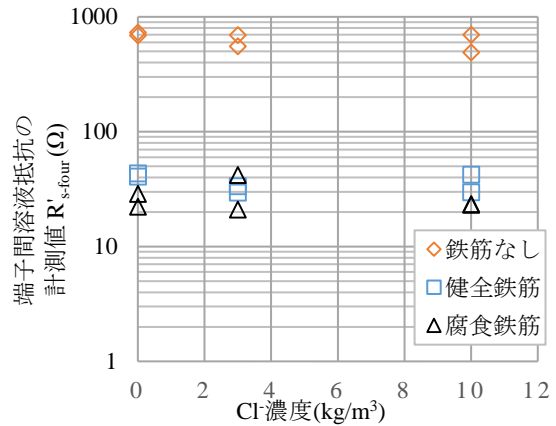


図-6 塩分濃度と端子間溶液抵抗の関係

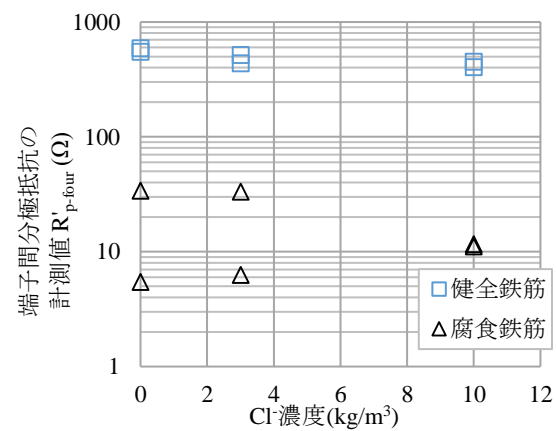


図-7 塩分濃度と端子間分極抵抗の関係

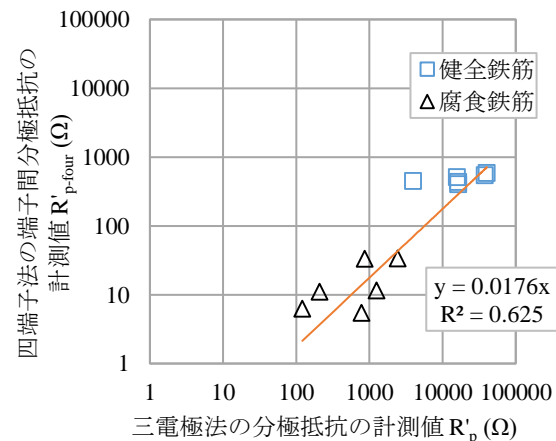


図-8 三電極法と四端子法の分極抵抗比較

し、四端子法は鉄筋表面に置いた内側の2端子間のインピーダンスから間接的に分極抵抗を算出しており、感度が異なるためと考えられる。

4. 四端子法を用いた腐食診断法の提案

4.1 検討概要

図-8で示した三電極法と四端子法の比較は計測値をそのまま比較したものであり、単位は(Ω)である。三電極法では、 $R_p(\Omega)$ に電流が実際に流れた鉄筋の表面積である被測定面積 $A(\text{cm}^2)$ をかけて単位面積あたりの分極抵抗 $R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ にしてから、式(1)を用いて腐食電流密度 $I_{\text{corr}}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ に換算する。四端子法を腐食速度に換算できる計測法にするためには、端子間分極抵抗 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ においても計測端子間隔、試験体の形状、鉄筋の配筋状況などによらない単位量に換算する必要がある。四端子法は、端子間隔や鉄筋量で計測値 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ が変化すると考えられるため、これらを要因とした計測を行い、実験的に腐食診断手法としての確立を目指した検討を行った。

4.2 端子間隔による端子間分極抵抗変化

四端子法の端子間隔による計測値の変化を考慮するために、表-2の鉄筋が埋設されている要因1体ずつに対して、図-3(a)における端子間隔を $d=1, 2, 3(\text{cm})$ と変えて、計測周波数 10kHz-100mHz, 印加電位差 $\Delta V=100(\text{mV})$ の条件下で計測を行った。端子間隔が端子自体の鉄筋軸方向の長さ(1cm)より小さい場合、端子の影響が大きくなると考えられるため、端子間隔の最小値を 1cm とした。計測により得られた各端子間隔の端子間分極抵抗 $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ の計測値を端子間隔 $a=1(\text{cm})$ における $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ で割った値と、端子間隔(cm)の関係を図-9に示す。

結果として健全鉄筋、腐食鉄筋によらず端子間隔が大きいほど $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ が大きくなり、最小二乗法による線形近似を行うことで端子間隔増加に伴う計測値の上昇程度を把握できることがわかった。この結果より、任意の端子間隔において四端子法により計測した $R'_{p\text{-four}}(\Omega)$ を単位長(1cm)あたりの値 $R_{p\text{-four}}(\Omega/\text{cm})$ に換算することが可能である。その換算式を以下の式(2)に示す。

$$R_{p\text{-four}} = \frac{R'_{p\text{-four}}}{0.56 \cdot d + 0.44} \quad (1 \leq d \leq 3) \quad (2)$$

ただし、 d : 端子間隔(cm), $R'_{p\text{-four}}$: 端子間分極抵抗の計測値(Ω), $R_{p\text{-four}}$: 単位長あたりの端子間分極抵抗(Ω/cm)である。この式(2)はばらつきがある実験結果から導出したものであるため、今後改良の余地が大きい。今後は端子間隔とかぶりの関係の影響も考慮に入れて検討する。

4.3 鉄筋量による端子間分極抵抗変化

鉄筋量の変化に伴う計測値の変化を検討するために、鉄筋が埋設されている同一要因のモルタル試験体を図-10に示すように 40mm×160mm の大きさのハイドロゲル

シートで電氣的に結合して四端子法による計測を行った。計測条件は、端子間隔 $d=3(\text{cm})$, 計測周波数 10kHz-100mHz, 印加電位差 $\Delta V=100(\text{mV})$ とした。その結果を図-11に示す。結果として、Cor-CL10以外の全要因において鉄筋量による計測値の変化は小さいことがわかった。

4.4 四端子法を利用した腐食診断手法の提案

4.2, 4.3の結果から $R'_{p\text{-four}}$ の単位量は、単位長あたりの値とすることが適切であると考えられる。そして、単位長あたりの端子間分極抵抗 $R_{p\text{-four}}(\Omega/\text{cm})$ は、式(2)により求めることが可能である。一方、三電極法の単位面積

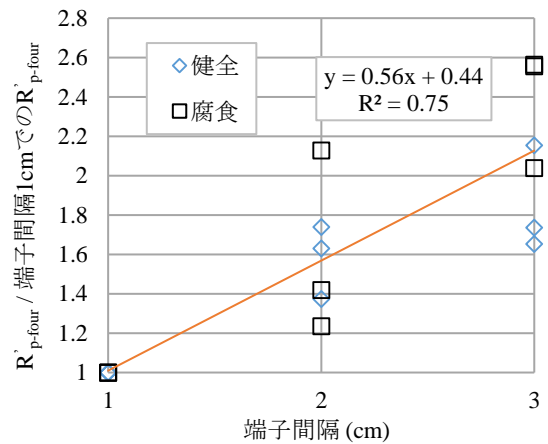


図-9 端子間隔による分極抵抗変化

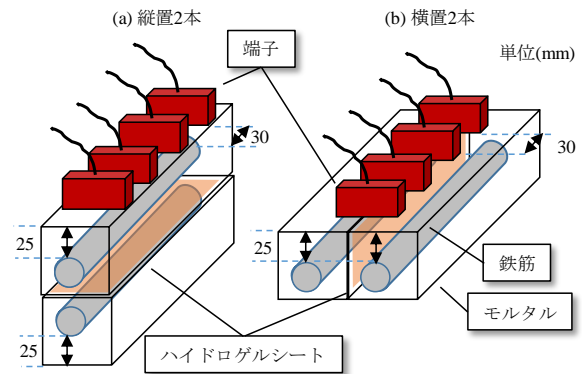


図-10 結合試験体に対する計測概要

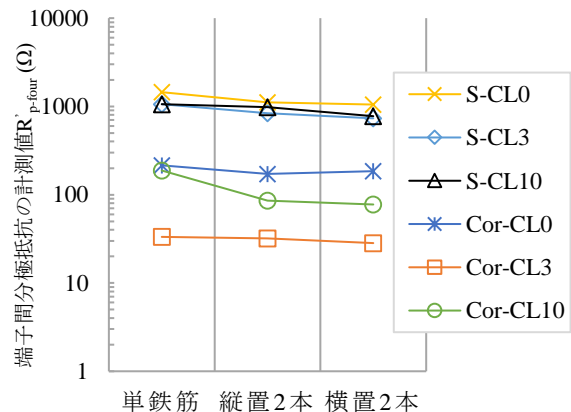


図-11 鉄筋量による分極抵抗変化

あたりの分極抵抗 $R_p (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ は、図-3(b)に示すような計測条件の場合、被測定面積 A を鉄筋の試験区間の全表面積とする。本研究の場合は、 $A=30.8(\text{cm}^2)$ となる。

この仮定を基に $R_{p-four}(\Omega/\text{cm})$ と $R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ を比較した結果を図-12に示す。 $R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ は式(1)を用いて腐食電流密度に換算できることから、この図中に示される最小二乗法による近似直線の回帰式である式(3)と式(1)、式(2)を組み合わせて用いれば、四端子法により求めた分極抵抗を腐食速度に換算することが可能となる。

$$R_p = \frac{R_{p-four}}{0.265} \quad (3)$$

さらに、四端子法により求めた $R_{p-four}(\Omega/\text{cm})$ を CEB⁴⁾の腐食グレーディングに対応させた表を表-3に示す。ただし、式(1)における K 値は $30(\text{mV})^{10)}$ とした。これに基づけば、本手法をコンクリート構造物の対策の優先度を重要度に応じて判定することが可能となる。

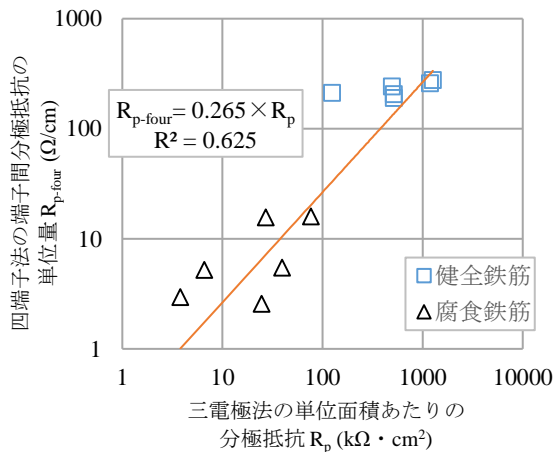


図-12 三電極法と四端子法の分極抵抗の単位量の比較

表-3 四端子法を用いた腐食グレーディング

corrosion rates	Current densities	$R_{p-four} (\Omega/\text{cm})$
high	$>1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	<7.95
moderate to high	$0.5 \text{ to } 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$7.95 \text{ to } 15.9$
low to moderate	$0.2 \text{ to } 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$15.9 \text{ to } 39.8$
passive condition	$<0.1 \text{ to } 0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$>39.8 \text{ to } 79.5$

今後は、コンクリート試験体や異形鉄筋を用いて、粗骨材や黒皮の影響、水分量や空隙などコンクリート性状の影響を実験的に検討する。

5. まとめ

本研究では、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本研究で提案した四端子交流インピーダンス法は、全く構造物を壊さない手法であるが、従来の三電極による手法と同様に腐食速度指標を算出できるこ

とを明らかにした。

- (2) 四端子交流インピーダンス法により求まる端子間分極抵抗 R_{p-four} に関して、モルタル試験体に対する計測から適切な単位量を設定でき、定量的な腐食速度評価に用いることができることを示した。

謝辞

本研究は科研費基盤研究(B)「18H01514: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」の助成を受けて実施した。北川章夫教授(金沢大学)、千葉大地教授(大阪大学)には多くの有用な助言をいただいた。また、大塚章様((株)日本ソフトテクニカル)には実験の補助をいただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 田中正吾, 大村直也: 電磁波レーダを用いた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋径の計測, 非破壊検査, Vol.57, No.7, pp.321-326, 2008.
- 2) 原田和樹, 渡辺健, 橋本親典, 石丸啓輔: 鉄筋コンクリート内を伝播する超音波を用いた鉄筋腐食の評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1879-1884, 2013.
- 3) ASTM: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, C 876-91, 1999
- 4) CEB: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin 243, 1998.
- 5) M.Stern and A.L.Gear: Eleprochemical Polarization, Journal of the Electrochemical Society, Vol.104, No.1, pp.56-63, 1957.
- 6) 染谷望: 電気化学的手法による塩害環境下コンクリート構造物の鋼材腐食評価の精度向上, 東京理科大学博士論文, 2016.
- 7) 福山智子, 岡本優輝, 長谷川拓哉, 千歩修: 誘電緩和特性を用いたコンクリート粗骨材界面のキャパシタ評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.193-200, 2016.
- 8) 福山智子, 岡本優輝, 長谷川拓哉, 千歩修: セメントペーストの誘電緩和特性に及ぼす混和材料と細孔容積の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.201-208, 2016.
- 9) 守屋進, 川俣孝治, 内藤英晴, 皆川浩: コンクリート構造物補修用セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法, 土木技術資料, Vol.49, No.7, pp.64-69, 2007.
- 10) 小林孝一, 宮川豊章: 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.173-186, 2001.