

論文 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

金光 俊徳^{*1}・左藤 眞市^{*2}・高谷 哲^{*3}・山本 貴士^{*4}

要旨：近年、鉄筋へのリード線導通を要しない完全非破壊での分極抵抗法の開発が多く行われているが、端子の配置方法および測定結果の解釈方法が不明確であるために、定量的な腐食速度指標の提案に至っていない。そこで本研究では、鉄筋を埋設した小型モルタル試験体に対する端子配置方法を変えた測定と有限要素法による電流分散解析から、測定結果の解釈方法を検討した。その結果、4端子配置で電流端子と電位差測定端子を近接させた配置（外寄り配置）が最適であること、鉄筋表面の電流密度分布から被測定面積を設定する方法、および3電極法による分極抵抗とほぼ一致する腐食速度指標とその算出方法を提案できた。

キーワード：交流インピーダンス法、4端子配置、非破壊検査法、腐食速度、鉄筋コンクリート

1. はじめに

近年では筆者らの既報¹⁾の参考文献に示すように、鉄筋へのリード線導通を要しない分極抵抗測定がいくつか試みられている。多くの実施例では、4個の端子を内部鉄筋の直上かつ平行に等間隔に配置する方法でインピーダンスを測定しているが、その根拠や最適な端子配置を検討した例は見当たらない。

そこで本研究では、鉄筋を埋設した小型モルタル試験体に対する端子配置方法を変えた測定と有限要素法による電流分散解析を行い、端子配置の最適化および非破壊による測定結果の解釈方法を提案した。

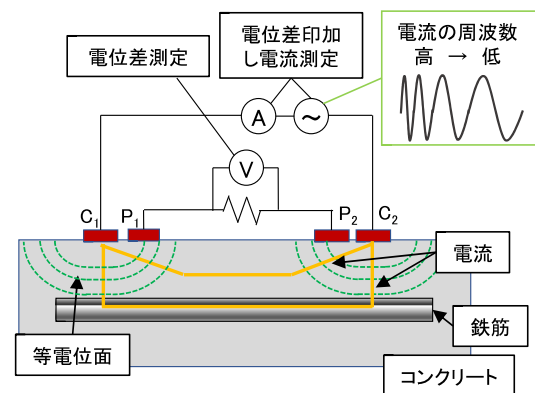


図-1 非破壊分極抵抗法の適用図(断面図)

2. 測定理論

筆者らが本論文で新たに提案する完全非破壊の腐食速度評価法を非破壊分極抵抗法と称し、図-1にその適用図を示す。この手法は、4個の端子をコンクリート表面に内部鉄筋の直上かつ平行に内側2端子を外側2端子に近接して配置し、外側の2端子に対して電圧をかけて広帯域の周波数の電流を印加し、内側2端子の電位差を測定することによってインピーダンスを算出する手法である。また、図-1中の電流の模式図では、コンクリートのみを流れる電流と鉄筋内部を経由する電流の2経路で示しているが、実際の電流はコンクリートおよび鉄筋内部に空間的に広がって分布している。

次に、図-1に示した2つの電流の経路に対応した非破壊分極抵抗法の等価回路は図-2で表される。この等価回路は、コンクリートのみを流れる電流の抵抗 R_1 、鉄筋内部に流れる電流のコンクリート部分の抵抗 R_2 、コンクリートから鉄筋内部に流れる電流の鉄筋表面の抵抗

R'_{p-ni} 、鉄筋表面の静電容量 C 、および鉄筋内部の抵抗 R_{steel} で構成される。この内、抵抗 R'_{p-ni} を見かけの非破壊分極抵抗と称する。また、鉄筋内部の電気抵抗率は $8.9 \times 10^{-8} (\Omega m)$ 程度²⁾と極めて小さく、測定結果の解釈にほとんど影響しないことから、抵抗 R_{steel} を以後考慮しないものとする。図-2に示した等価回路内の抵抗 $R_1(k\Omega)$ 、 $R_2(k\Omega)$ 、 $R'_{p-ni}(k\Omega)$ は、コンクリート表面から非破壊で測定可能な3種類の抵抗から求められる。3種類の抵抗とは、同じ端子配置で、鉄筋がない場合のコンクリートの抵抗 $R_s(k\Omega)$ 、鉄筋に電流が流入する場合の高周波の抵抗 $R_{Hi}(k\Omega)$ 、鉄筋に電流が流入する場合の低周波の抵抗 $R_{Li}(k\Omega)$ である。これらの抵抗値は図-2の等価回路の合成抵抗と解釈できることから、測定可能な抵抗値 R_s 、 R_{Hi} 、 R_{Li} は以下の式(1)、式(2)、および式(3)で表される。

$$R_s = R_1 \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_{Hi}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2} \quad (2)$$

*1 (一財)電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 博士(工学) (正会員)

*2 (地独)大阪産業技術研究所 金属表面処理研究部 博士(工学) (正会員)

*3 京都大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*4 京都大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

$$\frac{1}{R_{\text{fl}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2 + 2R'_{\text{p-ni}}} \quad (3)$$

式(1)の成立性は後の 4.2 に示す。 R_s の計測法としては、鉄筋への電流流入を低減するために対象鉄筋に対して直角方向に 4 端子を 1 列に配置する方法が挙げられる。

上記 3 つの式を展開すると、等価回路の抵抗成分 R_1 , R_2 , $R'_{\text{p-ni}}$ は以下の式(4), 式(5), および式(6)で算出できる。

$$R_1 = R_s \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{R_s \cdot R_{\text{fl}}}{2 \cdot (R_s - R_{\text{fl}})} \quad (5)$$

$$R'_{\text{p-ni}} = \frac{R_{\text{fl}} - R_{\text{fl}}}{2 \cdot (1 - R_{\text{fl}}/R_s) \cdot (1 - R_{\text{fl}}/R_s)} \quad (6)$$

続いて、見かけの非破壊分極抵抗 $R'_{\text{p-ni}}(\text{k}\Omega)$ に、解析によって求められる被測定面積 $A_{\text{ni}}(\text{cm}^2)$ を乗じることによって、式(7)に示すように 4 端子配置による非破壊分極抵抗 $R_{\text{p-ni}(4)}(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ を算出できる。

$$R_{\text{p-ni}(4)} = A_{\text{ni}} \cdot R'_{\text{p-ni}} \quad (7)$$

さらに、 $R_{\text{p-ni}(4)}$ は 4 端子配置において電流端子と電位差測定端子を分離しているために、端子とコンクリート界面の抵抗がない理想な場合の 2 端子配置による非破壊分極抵抗 $R_{\text{p-ni}(2)}(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ に対して過小評価となる。そこで 4 端子配置から 2 端子配置に換算する係数である端子配置倍率 $r_{2/4}$ を用いて式(8)によって換算する。

$$R_{\text{p-ni}(2)} = r_{2/4} \cdot R_{\text{p-ni}(4)} \quad (8)$$

実際の測定では端子とコンクリート界面の抵抗が測定するインピーダンスに含まれるため、ステンレスなどの分極性の金属電極を用いた場合は、接触抵抗が高くなり、2 端子配置で測定することは困難である。そのため、4 端子配置で測定し、2 端子配置の指標に換算するという上

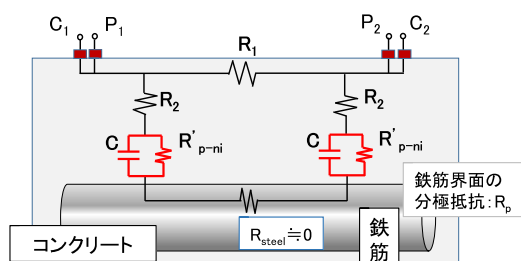


図-2 非破壊分極抵抗法の等価回路(断面図)

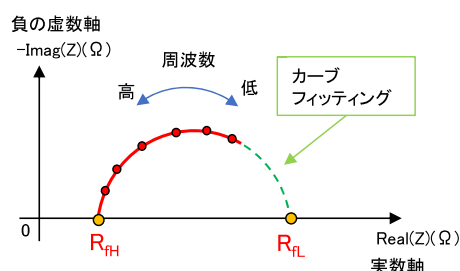


図-3 ナイキストプロットの模式図

記の手順を踏む必要がある。なお本論文では、電流端子と電位差測定端子が同一位置にある条件の 4 端子配置を 2 端子配置と称する。

$R_{\text{fl}}(\text{k}\Omega)$, $R_{\text{fl}}(\text{k}\Omega)$ は広範囲の周波数を用いた交流インピーダンス測定によって取得する。コンデンサと抵抗の並列回路の影響によって、測定値は図-3 に示す複素数平面上に半円形状のプロットの一部分として現れる。この形状に対するカーブフィッティングにより、高周波側の実数軸との交点の $\text{Real}(Z)$ を R_{fl} , 低周波側を R_{fl} として算出できる。一方、 R_s はコンクリートのみに対する測定の場合、周波数 1-100Hz 程度では $\text{Real}(Z)$ の変化がほとんどないことがすでに明らかなことから、周波数 100Hz 時の $\text{Real}(Z)$ の値を用いて算出する。

この測定理論に至った根拠を以下の実験および解析から示していく。

3. 端子配置方法に関する測定実験

3.1 試験体

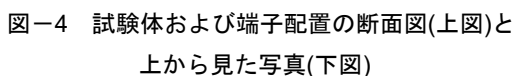
端子配置方法の実験的検討として、モルタル試験体および測定時の端子配置を図-4 に示す。試験体の寸法は $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ とし、埋設鉄筋は $\phi 10(\text{mm})$ で長さ $140(\text{mm})$ の黒皮のない丸鋼(SS400)を用い、両端から $20(\text{mm})$ ずつエポキシ樹脂で被覆することによって中央の $100(\text{mm})$ を試験区間とした。また、モルタル表面からの鉄筋の位置を固定するために、塩ビ製の六角ナットを用いた。腐食鉄筋は、健全鉄筋を気温 $40(^{\circ}\text{C})$, 相対湿度 $80(\%)$ の雰囲気下で 1 日 1 回 3 分間、 $3.0(\%)$ の NaCl 水溶液を噴霧する腐食促進装置内に 14 日間設置することによって作製した。設置 3 日目に鉄筋の上下を反転させた。腐食促進後は、ほぼ全面に赤さびを主とした腐食生成物が定着した。

次に、モルタル試験体の配合を表-1, 要因を表-2 に示す。試験体の配合は、 $W/C=55(\%)$, $C/S=1:3$ とした。モルタル試験体の材料として、水は水道水、セメントは(一社)セメント協会製の研究用セメント、細骨材は山砂(千葉県君津産、表乾密度 $2.57(\text{g}/\text{cm}^3)$, 吸水率 $2.40(\%)$)を用いた。打設後は気温 $20(^{\circ}\text{C})$, 相対湿度 $70(\%)$ の雰囲気下で、厚さ 0.010mm のポリ塩化ビニリデンフィルムを試験体に巻くことによって 2 週間の封かん養生を行った。

3.2 測定方法

試験体の測定にあたっては、表-3 の検討要因にしたがって実施した。図-4 に示すように、鉄筋直上のモルタル表面に鉄筋の長軸方向に平行に 2 個あるいは 4 個の端子を設置した。端子はステンレス(SUS304)製で寸法を $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 40\text{mm}$, 接触面を $10\text{mm} \times 40\text{mm}$ の面とし、モルタルとの接触にはハイドロゲルシートを用いた。端子の材質をステンレスとしたのは、安価かつ腐食しにく

次に、外側(内側)2 端子で振幅が $\Delta V=30(\text{mV})$ となる正弦波の交流電圧を周波数 $0.1\text{Hz}-10,000\text{Hz}$ で高周波から低周波に走査させながら印加して同端子間の電流を測定し、内側(外側)2 端子で電位差を測定し、測定電位差と測定電流の比としてインピーダンスを算出した。一方、2 端子配置においては表面に設置した 2 個の端子で電圧印加と電流測定を行った。 $\Delta V=30(\text{mV})$ とした理由は、 $\Delta V=10, 20(\text{mV})$ で測定した場合、 10Hz 以下の低周波数域での測定値のばらつきが大きかったが、 $\Delta V=30(\text{mV})$ ではそれが改善されたためである。 $D_{\text{out}}=110(\text{mm})$ または $D=110(\text{mm})$ とした。 $D_{\text{cp}}=10, 30, 70(\text{mm})$ と変化させることに加え、電流端子と電位差測定端子の位置関係を変更した。



試験体名	単位量(kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
	W	C	S
N,S ₂ Cor14d	292	530	1590

試験体名	鉄筋の種類	事前腐食期間(days)	試験体数
N	無		6
S	磨き	0	3
Cor14d	丸鋼	14	3

2 端子配置と 4 端子配置の比較測定結果として、図-5 に鉄筋の腐食要因ごとのナイキストプロットを示す。両図を比較すると、2 端子は 4 端子と比較して $\text{Real}(Z)(\Omega)$ 、 $\text{Imag}(Z)(\Omega)$ ともに非常に大きいことがわかる。また、腐食要因と健全要因を比較すると、2 端子配置ではほぼ同形状のプロットとなる一方で、4 端子配置では、健全要因より腐食要因の方が小さい半円の一部のプロットとなった。これは 2 端子配置では内部鉄筋の腐食による分極抵抗変化の取得が困難である一方で、4 端子配置では取得できることを示している。この理由として、2 端子配置

実験名	要因名	腐食状態	端子配置	外側と内側の端子間隔 D _{cp} (mm)
2 端子 と 4 端子の比較	腐食_2 端子	腐食	2 端子	-
	健全_2 端子	健全		
	腐食_4 端子	腐食	4 端子,電流	10
	健全_4 端子	健全	端子 C ₁ C ₂ が外側	
端子配置を変化させた測定	C 外_D _{cp} 10	健全	4 端子,電流	10
	C 外_D _{cp} 30		端子 C ₁ C ₂	30
	C 外_D _{cp} 70		が外側	70
	P 外_D _{cp} 10		4 端子,電位	10
	P 外_D _{cp} 30		端子 P ₁ P ₂ が	30
	P 外_D _{cp} 70		外側	70
	2 端子(解析のみ)		2 端子	-



- 696 -

では、電流印加と電位差測定を同一端子で行うため、端子に大きな電流が流れ、端子とモルタル界面の分極抵抗が電位差測定結果に大きく影響する一方、4端子配置では電流印加と電位差測定の端子を分離するため、電位差測定端子にほとんど電流が流入せず、端子とモルタル界面の分極抵抗が測定結果にほとんど影響しなかったためと考えられる。なお、端子は健全状態のステンレス(SUS404)であるため、端子とモルタル界面の分極抵抗は大きいと考えられる。

また、図-6の結果では電流端子と電位差測定端子の間隔 D_{cp} が大きいほどナイキストプロットの半円の一部の大きさが小さくなった。一方で、電流端子 C_1C_2 が内側と外側の場合で、形状や位置に変化は見られなかった。

4. 電流分散解析を用いた検討

4.1 解析方法

非破壊分極抵抗法による測定を再現し、対象や端子配置などの条件変化にともなう測定値変化を解析的に検討するために、3次元の有限要素法(FEM)による電流分散解析を行った。ソフトウェアはCOMSOL Multiphysics 内にある AC/DC module を使用した。図-7 にモルタル試験体に対する測定を模擬した解析モデル例を示す。解析手順として、まず図-4 の形状および端子配置にしたがって、鉄筋、端子、およびモルタルを模擬した四面体のメッシュ要素を生成した。そして、モルタル表面に配置した4端子の内、2個の電流端子 C_1C_2 の上面から定常状態の直流電流を印加し、2個の電位差測定端子 P_1P_2 の上面における電位差を取得した。要素の1辺の長さの最大値は0.56(cm)で、要素の総数は105,615個であった。解析に用いる構成則は、式(9)に示す連続方程式とした。なお、これ以降のベクトルの表記は太字の斜字とする。

$$-\nabla(\sigma \nabla V - \mathbf{J}_e) = 0 \quad (9)$$

ここで、 σ : 導電率($1/\Omega m$)、 V : 電位(V)、 $\mathbf{J}_e$: 外部で発生した電流密度(A/m^2)、 ∇ : ベクトルの微分演算子である。

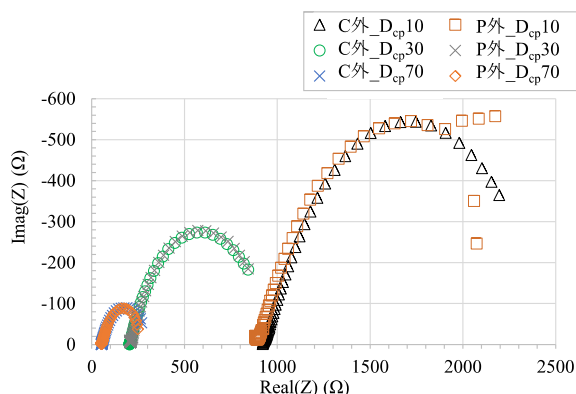


図-6 端子配置を変化させた測定結果

初期の電荷は0とし、端子の電流印加面、電位差測定面、および端子とモルタルの接触面以外のモルタル表面および端子表面は絶縁とした。その絶縁箇所の電流密度は式(10)を満たす。

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{n}$: モルタル表面の法線ベクトル、 $\mathbf{J}$: 電流密度(A/m^2)である。さらに、電流を流し出す2端子の電流印加面では、式(11)を満たす。

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_0 \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{J}_0$: 電流端子に流し出す電流密度(A/m^2)である。

図-7 は C_1C_2 を外側に配置した例であるが、 C_1C_2 を内側とすることや2端子配置の解析も可能である。この解析では、ジオメトリごとに単位体積あたりの電気抵抗としての電気抵抗率および単位面積あたりの表面抵抗を設定できる。そこで、鉄筋-モルタル界面における3電極法の分極抵抗 $R_p(k\Omega cm^2)$ を鉄筋表面に設定し、これを真値として、4端子法あるいは2端子法により求まる非破壊分極抵抗 $R_{p-ni}(k\Omega cm^2)$ が R_p の値とどのような関係にあるかを検討した。解析により求まる抵抗値 $R_a(\Omega)$ は以下の式(12)で定義される。

$$R_a = |V_2 - V_1| / I \quad (12)$$

ここで、 V_1, V_2 : 順に電位差測定端子の P_1, P_2 上面における電位の平均値(V)、 I : 電流値(A)である。この解析では、定常状態の直流を用いて解析を行うことから、鉄筋-モルタル界面のコンデンサ成分を考慮せず、鉄筋-モルタル界面の抵抗値を変化させることによって式(2)および式(3)の R_{ni}, R_{Li} を以下に示すように算出した。

条件設定として、電流端子の一方(C_1)には-Z方向に+1.0(μA)の電流を印加し、もう一方(C_2)は接地とした。低周波電流模擬は、界面の抵抗を3電極法の分極抵抗 $R_p(k\Omega cm^2)$ と設定し、その時の解析値を $R_a = R_{Li}(\Omega)$ とした。一方、高周波電流模擬は、鉄筋とモルタル界面の抵抗を、鉄筋の内部抵抗と同等の $8.9 \times 10^{-15}(k\Omega cm^2)$ とし、その時の

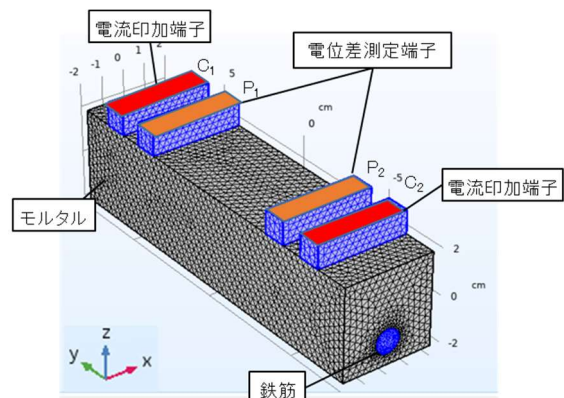


図-7 非破壊測定を模擬した解析モデル例

解析値を $R_a = R_{RH}(\Omega)$ とした。モルタルの電気抵抗率は、鉄筋が埋設されていないモルタルに対する測定実験から得られた電気抵抗 $R_s(\Omega)$ を換算した概算値である $\rho=50(\Omega m)$ とした。これは、表-2 に示す鉄筋が埋設されていない要因(N)に対する非破壊分極抵抗法の測定結果から求めた値である。端子の電気抵抗率は鉄筋と同等の $8.9 \times 10^{-8}(\Omega m)$ とし、端子とモルタル間の抵抗は端子内部と同等である $8.9 \times 10^{-15}(k\Omega cm^2)$ とした。実際には、端子とモルタル間には分極抵抗が存在するが、この解析ではそれがない理想的な条件下での解析を行うことが目的であるため、上記の設定とした。また、モルタル部の電気抵抗率は、実際には試験体内で不均一であるが、解析では電気抵抗率を均一と仮定して計算している。

4.2 鉄筋なしモルタルの解析

式(1)の成立を確認するため、2 端子配置における端子間隔 $D=110mm$ と設定した場合の鉄筋なしモルタルの中央直交断面における電流密度を図-8 に示す。鉄筋がない場合の電流分布において測定面からの距離が短いほど多く流れ、長いほど電流密度が小さくなることからわかる。このことから、鉄筋が存在することによる R_i の電流分布への影響は小さくなると考えられる。したがって、式(1)が成り立つとした。

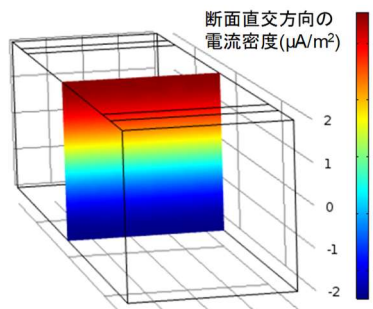


図-8 鉄筋なしモルタルの解析結果

4.3 被測定面積の算出

電流分散解析の例として、鉄筋表面の分極抵抗を $R_p=100(k\Omega cm^2)$ 、2 端子配置における端子間隔 $D=70mm$ と設定した場合の鉄筋表面の電流密度を図-9 に示す。 $R_p=100(k\Omega cm^2)$ は健全鉄筋を模擬しており、解析結果は鉄筋表面に流入する電流密度($\mu A/m^2$)を表している。モルタルから鉄筋内部に電流が流入する方向を正とし、その反対方向を負と定義した。結果は鉄筋の中央における表面で $0(A/m^2)$ となり、 C_1 側で正の値、 C_2 側で負の値となる。ここで、図-2 に示した非破壊分極抵抗法の等価回路において、鉄筋とモルタルの界面に 2 個の R'_{p-ni} を設定しているが、この解析上では R'_{p-ni} のひとつが正の値の電流範囲、もうひとつが負の値の電流範囲を評価した抵抗成分であると解釈できる。そのため、被測定面積 A_{ni} を評価する際には正の値の範囲のみを対象とする。

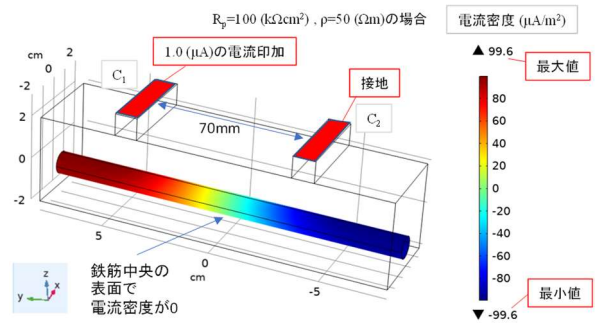


図-9 鉄筋表面の電流密度分布の算出結果

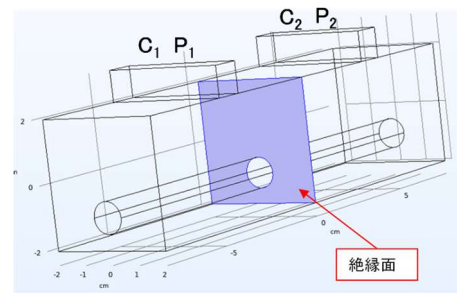


図-10 絶縁面の設定

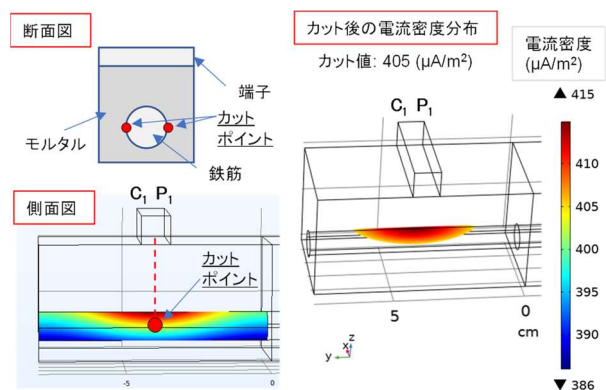


図-11 カットポイントと電流密度分布

ここで、鉄筋表面の電流密度に着目すると、鉄筋表面の分極抵抗 R_p を均一と設定しているにも関わらず、電流密度の最大値が鉄筋の外側端部に偏っている。これは、電流分布の平均的な経路として、 C_1 から印加した電流が、モルタル中では接地箇所である C_2 方向に対して反対方向に流れて、鉄筋に流入してから C_2 方向に流れることを示している。このような電流分布になる理由として、 C_1 から鉄筋表面付近に向けて流れる電流の内、鉄筋内部に流入せずにモルタルのみを経由して C_2 に流入する電流が多く含まれるためと考えられる。すなわち、 A_{ni} の評価の際には、図-2 における R_2 と R'_{p-ni} を流れる回路の電流のみを対象とする必要があるが、この解析方法では R_i を流れる回路の電流も合わせて評価しているということである。そこで、 R_i を流れる回路の電流の影響を除外するために、図-10 に示すように、モルタルの長さ方向の

表-4 端子配置ごとの腐食速度指標の解析結果

配置方法	2 端子配置	D _{cp} =10mm	D _{cp} =30mm	D _{cp} =70mm
見かけの非破壊分極抵抗 R' _{p-ni} (Ω)	19,348	8,420	3,406	2,018
被測定面積 A _{ni} (cm ²)	5.29	5.29	5.29	5.29
非破壊分極抵抗 R _{p-ni} (kΩcm ²)	102.3	44.6	18.0	10.7
端子配置倍率 r _{2/4}	1	2.3	5.7	9.6

中央部の鉄筋軸直角断面に絶縁面を設定した。この絶縁面はモルタル箇所のみを絶縁し、鉄筋内部は絶縁しないものとした。結果として、図-11 左下図に示すように、電流印加した C₁ 直下の鉄筋表面の電流密度が最大値となり、C₁ から離れるほど小さくなった。これは C₁ から最短距離で導電体である鉄筋に電流が流れ込んでいることを示しており、現象として想定できるものである。絶縁面の設定によって鉄筋内部に流入する電流の鉄筋表面における電流密度分布を正確に算出できたと考えられる。

ここで、被測定面積 A_{ni} は鉄筋表面のあるカットポイントにおける電流密度をしきい値として、それを下回る電流密度を除外(カットオフ)し、しきい値以上の電流密度となる面積を算出することによって評価される。これは、実際に算出される抵抗値に影響を与えない電流密度も解析上では算出してしまうためである。仮にカットオフがない場合、A_{ni} は常に鉄筋の対象範囲の全表面積となる。図-11 にカットポイントと電流密度分布を示す。カットポイントは、端子直下の鉄筋周上で高さ方向に中央の点とした。これは、鉄筋表面において端子と反対側となる面にはほとんど電流流入しないという考え方に基づく。A_{ni} は図-11 右図における鉄筋表面の色付きの面積で設定される。カットオフ後の電流量は、本条件では鉄筋に流入させた全電流量 1.0A に対して、0.22A であった。

解析による検証結果として、表-4 に端子配置ごとの腐食速度指標の解析結果を示す。各種抵抗値 R_{FL}, R_{GH}, R_s を解析によって求め、式(6)を用いて R'_{p-ni} を算出した。A_{ni} は、D_{out}=110(mm)の場合、いずれの端子配置方法においても A_{ni}=5.29(cm²)であった。なお、先述の絶縁面は被測定面積の算出の際のみ設定している。非破壊分極抵抗 R_{p-ni} はこの A_{ni} と式(7)を用いて算出した。結果として、2 端子配置では R_{p-ni} が内部鉄筋の分極抵抗の設定値である R_p=100(kΩcm²)とほぼ一致した一方、4 端子配置では D_{cp} の値に応じて、R_p に対して過小評価することが明らかとなった。したがって、2 端子配置の解析結果において被測定面積 A_{ni} の算出方法が妥当であることがわかった。

しかし、図-5 で示したように、2 端子配置では端子とモルタル間の抵抗の影響で実際に測定することは困難である。そこで、4 端子配置で測定して R_{p-ni(4)}を算出し、端

子とモルタル間の抵抗がない 2 端子配置の R_{p-ni(2)}に換算する方法を構築する。ここで、各端子配置における R_{p-ni(2)} と R_{p-ni(4)}の比を端子配置倍率 r_{2/4} と定義し、その算出結果を表-4 中に示す。解析によってあらかじめ r_{2/4} を算出しておけば、4 端子配置で測定、算出した R_{p-ni(4)}に式(8)に基づいて分極抵抗とほぼ一致する R_{p-ni(2)}を算出できる。

ここで、4 端子配置の中では電流端子と電位差測定端子の間隔 D_{cp} が小さいほど過小評価が小さく、インピーダンスを大きく(感度を高く)算出できることから、これらの端子を近接させた外寄り配置(D_{cp}=10mm)が最も高精度に測定できると考えられる。したがって、本検討の範囲内では、4 端子の外寄り配置が最適な端子配置であることがわかった。

5. まとめ

本論文では以下のことが明らかとなった。

- (1) 端子配置を変化させた測定結果から、2 端子配置では、端子とモルタル間の抵抗の影響で測定が困難であり、4 端子配置では端子とモルタル間の抵抗がない 2 端子配置の非破壊分極抵抗に対して過小評価することが明らかとなった。
- (2) 電流分散解析により、端子とモルタル間の抵抗がない 2 端子配置の非破壊分極抵抗が、鉄筋表面の分極抵抗の設定値とほぼ等しいことを示した。このことから、提案した被測定面積の算出方法が妥当であると判断できる。
- (3) 4 端子配置において電流端子と電位差測定端子の距離が大きいほど過小評価が大きいことを実験と解析の両方で示した。このことから、外寄り配置が最適であることおよび解析により求まる端子配置倍率を用いて非破壊分極抵抗の算出結果を補正できることを示した。

参考文献

- 1) 金光俊徳, 小野新平: 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, 土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.315-331, 2020.
- 2) 国立天文台 編: 理科年表 2018, 丸善出版, 2017.