不動態皮膜の劣化やコンクリートの乾湿が電気伝導特性に及ぼす影響に関する研究

吉田秀典¹・大本修平²

¹香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp

²元香川大学学生

コンクリート構造物の老朽化や公共事業の縮減に伴い、既存のコンクリート構造物を長期的に運用していく必要がある。その際に、構造物の維持管理上から、早期にコンクリート内の鉄筋腐食状態等を非破壊モニタリングする技術が望まれている。そのような中、コンクリート中の鉄筋の腐食速度の推定と腐食の定量評価が可能である分極抵抗法が注目されている。しかしながら、研究に関しては基礎的なレベルの事案が多く、不動態皮膜の劣化やコンクリートの乾湿が電気伝導特性に及ぼす影響について論ぜられていないのが実態である。そこで本研究では、有限要素解析を行い、不動態皮膜の劣化やコンクリートの乾湿が電気伝導特性に及ぼす影響について検討した。その結果、両因子が電気伝導特性に影響を及ぼすこと、特に、コンクリートの乾湿は大きな影響を及ぼすことが判明した。

Key Words: *Degradation of passivation film, Wetting and drying of concrete, Property of electrical conduction*

1. はじめに

わが国では、戦後の高度成長期にコンクリート構造物が集中的に建設された。この時期に大量に建設された鉄筋コンクリート構造物については、品質に相当のばらつきがみられ、多くの構造物において、様々な変状が報告されており、今後、少なからず更新せざるを得ないものも出てくることが予想される。

国土交通省によると全国で15m以上の橋梁が約14万橋ある。このうち、50年以上経過した橋は、2006年度に8,900橋（全体の6%）、2016年度28,400橋（全体の20%）、そして2026年度66,300橋（全体の47%）に達する¹⁾。しかしながら、近年では公共事業の縮減により、既存のコンクリート構造物を建て替えるということは考えられにくく、既存のコンクリート構造物を維持管理しながら長期的に運用していく必要がある²⁾。

鉄筋コンクリート構造物を長寿命化させるには、コンクリートや鉄筋の劣化の原因と程度を探り、適切な処置を施す必要があるが、構造物を供用しながら劣化の原因や程度を探ることになるので、構造物を破壊することなく検査すること、つまり、非破壊検査が望まれる。ここでコンクリート中にある鉄筋に焦点を当てると、その非破壊検査法には超音波法や電磁波法、電気化学的手法などがあり、電気化学的手法が多用されている。電気化学的手法には自然電位法^{3),4)}や分極抵抗法^{5),6),7)}、これらを複合したもの^{8),9),10),11),12)}など

様々なものがあるが、分極抵抗法では鉄筋の腐食速度を推定することが可能であり、鉄筋の腐食を定量的に評価できる¹³⁾ことからこの手法が注目されている。

2. 分極抵抗法の概要

分極抵抗法に関する既往の研究としては、実験的研究と数値解析の研究に分けられる。実験的研究として、分極抵抗法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価の有効性が独立行政法人土木研究所¹⁴⁾や横田ら^{15),16),17),18),19),20)}によって検討されている。横田らは電氣的に分割された径13mmの鉄筋を、かぶり30mm、間隔150mmに井桁状に配筋した平板タイプのコンクリート試験体（寸法：縦700mm×横700mm×厚さ100mm）を対象に、コンクリート表面に設置したセンサー（対極）から内部鉄筋への電流分散状況を調べ、腐食している場合にはセンター対極直下の鉄筋に電流が集中することを確認するとともに、2重対極方式の有効性を報告している²¹⁾。しかしながら、電流分散範囲は鉄筋の腐食だけでなく、鉄筋径やかぶり、さらには躯体内の水分量等の影響を受けることから^{22),23)}、本来はこれらのパラメータを変化させて多数の組み合わせで実験などを行う必要がある。多数の供試体を作製して実験を行うことは困難をともなうことに加え、実験ではコンクリート内の電流分散状況の把握が難しいことから、数値解析による検討が有用となる。

これを受けて、金田らは境界要素法を用いて電流分布シミュレーションを行い、電流分布状況の把握などを試みている^{24),25),26),27)}。松岡らは境界要素法による電流分布シミュレーションにより、鉄筋径やかぶりなどが変化した場合の電流の拡散傾向を確認できることを示した²⁸⁾。しかしながら、コンクリート構造物の内部は不均一であること、また、鉄筋の腐食が全面的ではなく部分的であることや、躯体の乾燥等が一律でないことも考えられることから、材料の非均一性が考慮されない境界要素解析には限界がある。材料の非均一性を考慮できる有限要素法を用いた電流伝導解析を行っている事例もあるが、鉄筋コンクリートの非均一性の影響を検討するには至っていない²⁹⁾。

一方で、コンクリートの乾湿と抵抗率の関係性についての研究も行われており^{30),31)}、コンクリートの抵抗率に対する乾湿の影響は大きいことが分かっている。また、コンクリートは一樣に乾燥が起きるとは考えにくく、表面と内部では含水率は異なり、劣化によりひび割れが生じ、その付近の乾燥が局所的に進む。既往の研究では、コンクリートの非均一性に着目した解析事例はほとんどないが、鉄筋の非均一性だけでなくコンクリートの非均一性も電気分散範囲に影響を与えると考えられる。そこで本研究では、鉄筋表面の不動態皮膜の劣化による分極抵抗の非均一性ならびにコンクリートの乾湿にともなう抵抗率の非均一性を考慮した電気伝導解析を行い、こうした非均一性が電流分散状況に及ぼす影響について調べることを目的とする。

3. 基礎理論の概要

静電場が満たす方程式は、マクスウェルの方程式の時間の項を省いた次式となる。

$$\nabla \cdot D = q \quad (1)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

ここで、 D は電束密度、 E は電場の強さ、そして q は電荷密度である。ただし、物質中では

$$D = \epsilon E \quad (3)$$

の関係がある。ここで、 ϵ は誘電率である。ここでは等方的な物質を考えることとする。こうすることで、誘電率はスカラー量として取り扱うことができ、計算が簡単になる。静電場の問題は、すべて電束密度と電場の関係式 (3) を用いて、連立偏微分方程式 (1) と (2) を解くことになる。

通常、静電場の問題では、電場 E を計算するよりもポテンシャルを計算する方が簡単である。電場はベクトルで未知数が 3 個あるが、ポテンシャルはスカラーなので未知数が 1 個で済む。このポテンシャル ϕ は、正

確にはスカラーポテンシャルと称され、

$$E = -\nabla\phi \quad (4)$$

と定義される。こうすることにより、マクスウェルの方程式 (2) が満足される。

これにて、静電場のマクスウェルの方程式の一つが満足されたので、残りの一つを満足させるためのスカラーポテンシャルの条件を探せばよい。式 (1)、式 (3) および式 (4) より、

$$q = \nabla \cdot D = \nabla \cdot \epsilon E = -\nabla(\epsilon \nabla\phi) \quad (5)$$

が導かれる。これが静電場を計算する際のスカラーポテンシャルが満たすべき偏微分方程式である。右辺と左辺を入れ替えて、改めて式を示すと

$$\nabla(\epsilon \nabla\phi) = -q \quad (6)$$

となる。ここで、誘電率を一定値とすると微分の外に出すことができ、次のようなポアソン方程式が得られる。

$$\nabla^2\phi = -\frac{q}{\epsilon} \quad (7)$$

また、計算する領域内に電荷がない場合は、次のようなラプラス方程式が得られる。

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (8)$$

式 (8) を改めて示すと、次のようになる。

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

ここで、境界条件が以下のように

$$S_1 : \phi = \phi_B \quad (10)$$

$$S_2 : \frac{\partial\phi}{\partial n} + \bar{q} = 0 \quad (11)$$

と与えられるとする。ここで、 ϕ_B は Dirichlet 境界 S_1 にて与えられる既定ポテンシャル、 $\bar{q}$ は Neumann 境界 S_2 にて流れ出る既定電流量、 n は単位法線ベクトルである。式 (9) を、境界条件式 (10)、式 (11) の下で解くことは、次式の汎関数を最小にすることと等価である。

$$I = \int_V \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \right\} dV + \int_{S_2} \bar{q}\phi dS \quad (12)$$

いま、

$$\{g\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial\phi}{\partial x} \\ \frac{\partial\phi}{\partial y} \\ \frac{\partial\phi}{\partial z} \end{array} \right\} \quad (13)$$

$$\{g\}^T = \left\{ \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad \frac{\partial\phi}{\partial y} \quad \frac{\partial\phi}{\partial z} \right\} \quad (14)$$

とすると、式 (12) は

$$I = \int_V \frac{1}{2} [\{g\}^T \{g\}] dV + \int_S \bar{q}\phi dS \quad (15)$$

となる。

解析対象を有限な要素に分割し、要素内の電流分布を次のように表現する。

$$\phi(x, y, z) = [N(x, y, z)]\{\Phi\} \quad (16)$$

ここで、 $[N]$ は節点の状態量と要素内の状態量を結びつける形状関数マトリックスであり、 $\{\Phi\}$ は各節点における要素の節点状態量を示す。 $\{g\}$ を形状マトリックス $[N]$ で表わすと

$$\begin{aligned} \{g\} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \dots & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \dots & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \dots & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{Bmatrix} \\ &= [B]\{\Phi\} \end{aligned} \quad (17)$$

となり、式 (17) の $[B]$ は形状関数マトリックスを微分したマトリックスである。式 (15) の右辺に上記マトリックス $[B]$ を用いると、

$$\int_V \frac{1}{2} \{g\}^T \{g\} dV = \int_V \frac{1}{2} \{\Phi\}^T [B]^T [B] \{\Phi\} dV \quad (18)$$

$$\int_S \bar{q} \phi dS = \int_S \bar{q} [N] \{\Phi\} dS \quad (19)$$

となり、これらを式 (15) に代入すると、

$$I = \int_V \frac{1}{2} \{\Phi\}^T [B]^T [B] \{\Phi\} dV + \int_{S_2} \bar{q} [N] \{\Phi\} dS \quad (20)$$

となる。 I の最大値を求めるために、式 (20) を $\{\Phi\}$ で微分する。具体的には、 $\{\Phi\}^t [A] \{\Phi\}$ を $\{\Phi\}$ で微分することになるが、

$$\frac{\partial}{\partial \{\Phi\}} (\{\Phi\}^T [A] \{\Phi\}) = 2[A] \{\Phi\} \quad (21)$$

であることより、式 (20) の右辺第 1 項は

$$\frac{\partial}{\partial \{\Phi\}} \left(\int_V \frac{1}{2} \{\Phi\}^T [B]^T [B] \{\Phi\} dV \right) = \int_V [B]^T [B] \{\Phi\} dV \quad (22)$$

右辺第 2 項は

$$\frac{\partial}{\partial \{\Phi\}} \left(\int_{S_2} \bar{q} [N] \{\Phi\} dS \right) = \int_{S_2} \bar{q} [N]^T dS \quad (23)$$

となる。したがって、

$$\frac{\partial I}{\partial \{\Phi\}} = \int_V [B]^T [B] \{\Phi\} dV + \int_{S_2} \bar{q} [N]^T dS = 0 \quad (24)$$

となる。以上より求められた式は

$$[K]\{\Phi\} + \{F\} = 0 \quad (25)$$

と表される。ただし、

$$[K] = \int_V [B]^T [B] dV \quad (26)$$

$$\{F\} = \int_{S_2} \bar{q} [N]^T dS \quad (27)$$

である。

図-1 供試体概略

図-2 供試体のサイズ

4. 解析対象とそのモデル化

鉄筋コンクリート中の電流分散状況を把握するために、供試体中央（図-1 中の上面の短形領域）のコンクリート表面に電圧を印加し、不動態皮膜部の劣化やコンクリートの乾湿がコンクリート中の電流分散状況に及ぼす影響について検討するために、不動態皮膜の分極抵抗やコンクリートの電気抵抗率を変化させて 3 次元有限要素解析を実施する。

(1) 供試体寸法

解析では、図-1、図-2 に示すようなコンクリート供試体を用いる。なお、本論文では、紙面に限りがあることから鉄筋径を 25 mm（図には示していない）、かぶり（図中の t ）を 60 mm とした解析例についてのみ示すこととする。また、以降に示すメッシュ等では、不動態皮膜部を除き、長さの単位を mm としている。

(2) 解析メッシュ

図-1、図-2 を基に解析メッシュを作成した。供試体中央の鉄筋直上のコンクリート表面に対極を設置した場合、対称性を勘案することで有限要素解析の節点および要素数の削減が可能となることから、図-1 に示す全体領域の 4 分の 1 を解析対象領域とした。解析領域ならびに解析メッシュを図-3 と図-4 に示す。図-4 の凡例の Concrete はコンクリート要素を、Rebar は鉄筋要素を、Passivation film / Corrosion はコンクリートと鉄筋の境界部要素（不動態皮膜部）を、Isolation は絶縁要素を、そして Impress は電圧印加領域を表している。コンクリートと鉄筋の境界部付近を拡大した図-5 に示すように、鉄筋要素、境界部要素、そしてコンクリー

図-3 解析領域 (D25, かぶり 60 mm)

図-4 解析メッシュ (D25, かぶり 60 mm)

図-5 不動態皮膜部

ト要素を配置し，図-2 に示す通り，コンクリートと鉄筋の境界部のうち鉄筋端から 100 mm を絶縁部（図中，両端部の青色部分，絶縁要素）としている．絶縁要素については，この要素の電気抵抗を極めて大きくする（ $1.0 \times 10^{16} \text{ k}\Omega\text{cm}$ で，通常の鉄筋の 10^{21} 倍以上）ことで表現した．なお，要素はすべて 8 節点六面体要素（アイソパラメトリック要素）で，総節点数は 31,784，総要素数は 28,392 である．

(3) 電気抵抗率

本解析は，簡単に言えばオームの法則（ $V = RI$ ）に従うような問題を解くことになるので，与えられた電位（ V ）に対して，求まるのは電流（ I ，あるいは電流密度 J ）であり，材料特性として抵抗（ R ，あるいは抵抗率 ρ ）を与える．

一般に，コンクリートの表面が水に接している環境を除いて，コンクリートは表面近傍が乾燥して抵抗率が大きく，内部では相対的に湿度が高いため抵抗率が小さい状態となっている．金田ら³²⁾は表面近傍と内部の抵抗率にどの程度であるかを調べるために，比抵抗測定用の電極（ステンレス棒）を埋め込んだコンクリート試験体を作製し，異なる環境（恒温養生室や屋

図-6 コンクリートの乾燥状態と抵抗率

図-7 鉄筋の表面の電流密度の一例

表-1 養生期間とコンクリート抵抗率の関係

養生 期間	コンクリート抵抗率 ρ (k Ωcm)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
30 週	20	23	26	29	32	35	48	60
50 週	25	32	39	46	53	60	105	150
70 週	35	48	61	74	87	100	160	220
90 週	40	62	84	106	128	150	230	310
98 週	40	68	96	124	152	180	305	430

外）で暴露して深さごとの抵抗を測定している．本研究では，金田ら³²⁾が行った測定のうち，水セメント比（ W/C ）40%で恒温養生を行った際のコンクリートの抵抗率を用いて解析を行う（表-1 参照）．金田らはコンクリート表面から 10 mm，20 mm，60 mm にて抵抗率を測定しているので，解析では，測定値を一次関数で補間した値を用いる．なお，コンクリート表面から 60 mm より深部ではコンクリートの抵抗率は一定とし，深度 60 mm の点で読み取った値を用いる．コンクリート表面より深さごとの乾燥に伴う抵抗率を設定するために図-6 に示すような要素割を行う．要素ごと（表中の 1，2，... が図中の Concrete1，Concrete2 ... に対応）かつ養生期間ごとの抵抗率を表-1 に示す．

不動態皮膜以外の鉄筋部分については，理科年表に示されている鉄の 0°C における抵抗率（ $8.9 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega\text{cm}$ ）を採用し，すべての解析ケース（養生期間）でこれを用いた．また，解析では，次式を用いて，真の分極抵抗 $R_p = R'_p \times A$ を抵抗率 ρ_p に換算し，解析パラメータとした．

$$\rho_p = \frac{R'_p \times A}{l} = \frac{R_p}{l} \quad (28)$$

ここで、 R_p' はみかけの分極抵抗 (Ω)、 l は不動態皮膜の厚さ、 A は被測定面積である。みかけの分極抵抗を測定する場合、通常、センター対極 (CCE) とガード対極 (GCE) という 2 つの対極センサーを用いて測定を行っており、2 つの対極のうち CCE に流れる電流を計測している。全電流量のうち、約 30% が CCE に流れることが実験にて確認されている¹³⁾、本研究では、この範囲を「被測定面積」と称している。この範囲が広いほど電流は広く拡散する、つまり不動態皮膜は健全で、逆に、狭いほど電流は狭い範囲に留まっている、つまり不動態皮膜が劣化している、あるいは損傷等を受けていることを示唆する。図-7 は鉄筋表面の電流密度の一例であるが、被測定面積が広いというのは、全電流量の約 30% が CCE に流れる領域が、例えば、図の灰色からオレンジまでの領域に該当するのに対し、狭い場合は、灰色の領域のみが該当するというようなイメージである。不動態皮膜は 2 nm～6 nm というのが一般的であるが³³⁾、本解析では、やや大きめに 10 nm とした。なお、本研究では、不動態皮膜が部分的あるいは全面的に劣化するという設定をすることで鉄筋コンクリートにおける非均一性を議論するため、分極抵抗の抵抗率については、様々なパターンを用いている。そのため、その値については、次小節にて示す各解析ケースごとに詳細に説明することとする。

(4) 境界条件

境界条件に関しては、供試体上部 (図-1 における上面中央の矩形領域) に 10 mV を印加し、鉄筋端を 0 V とした。なお、実際の測定器のセンサ部は円形 (断面積：約 72 cm²) であるが、解析メッシュは直方体を基本としていることから、解析におけるセンサ部 (印加箇所) の領域については、実際の機器の面積と同じになるように矩形領域にて設定した。

5. 解析結果と考察

本節では、不動態皮膜における分極抵抗の値、劣化箇所とその大きさ、そしてコンクリートの乾湿が躯体内の電流伝播に及ぼす影響の把握を目的として実施した解析について考察を行う。

(1) 不動態皮膜の劣化箇所と劣化程度について

本小節では、不動態皮膜の一部のみが劣化している場合に、その箇所ならびに低下した分極抵抗の値が被測定面積および電流伝播に及ぼす影響の把握を目的として解析を行った。劣化部では、劣化していない箇所の分極抵抗値 (本論文では、全ての解析で 1000 k Ω cm² と設定) と比較して抵抗値が小さくなるが、どの段階で

図-8 劣化箇所配置図

どの程度の劣化になるかについては不明な点も多いことから、本解析では、簡易的に半分、10 分の 1、そしてそれらの間をとって 5 分の 1 という 3 パターンを考え、本研究では、これらを「分極抵抗比＝劣化部の分極抵抗値／健全部の分極抵抗値」と定義する。また、その箇所も供試体の中央 (図-8 の右端) から 100 mm (図-8 のクリーム色の領域)、200 mm (図-8 の緑色の領域)、300 mm (図-8 の黄色の領域) ならびに 400 mm (図-8 の青色の領域) の 4 パターンを考え、その劣化領域の大きさは、全ての解析において 100 mm としている。なお、本小節では、不動態皮膜の劣化の影響のみを考察したいことからコンクリートについては乾湿等の影響は考慮せず、全てのコンクリート要素にて一定の抵抗率 (文献³⁴⁾ を参考に 40 k Ω cm と設定) を用いている、

まず、100 mm の劣化領域を供試体の中央 (図-8 の右端) から 100 mm のところ (図-8 のクリーム色の領域) に設け、分極抵抗比のみを変化させた場合について考察する。この場合の電流密度分布図を、図-9 から図-12 に示す。図より、分極抵抗比を小さくすると、劣化領域への電流の流れ込みと鉄筋下部からの電流の流入がより顕著になることがわかる。劣化領域への電流の流れ込みと鉄筋下部への回りこみが顕著となると、劣化領域より遠方 (図-8 における左側方向) への電流の広がりほとんど認められないことがわかる。例えば、電流密度 0.3 という値 (紫色と赤色の境となる値) に着目すると、劣化が無い場合 (図-9)、供試体上面では、その値は供試体の右端より 250 mm 弱の箇所に位置しているが、分極抵抗が小さくなるにしたがって、その値を示す箇所は右側にシフトしていることが分かる。この場合、被測定面積は小さくなる。図-10 から図-12 は 100 mm の劣化領域を供試体の中央 (解析メッシュでは右端) から 100 mm のところに設けたケースであるが、図-13 から図-15 は、分極抵抗比が 1/2 のケースについて、100 mm の劣化領域を供試体の中央 (解析メッシュでは右端) から 200 mm (200～300 mm 区間、図-8 の緑色の領域)、300 mm (300～400 mm 区間、図-8 の黄色の領域) ならびに 400 mm (400～500 mm 区間、図-8

図-9 電流密度分布図 (劣化なし)

図-13 電流密度分布図 (劣化領域 200-300 mm)

図-10 電流密度分布図 (分極抵抗比 1/2)

図-14 電流密度分布図 (劣化領域 300-400 mm)

図-11 電流密度分布図 (分極抵抗比 1/5)

図-15 電流密度分布図 (劣化領域 400-500 mm)

図-12 電流密度分布図 (分極抵抗比 1/10)

の青色の領域)の箇所に設けた場合の電流密度分布図である。図-10 ならびに図-13 から図-15 より、劣化領域の移動にともなって躯体内を伝播する電流の状況が変化している。それは躯体内部の鉄筋付近、特に劣化領域前後で顕著であるが、躯体の上面(印加した面)近傍では若干の変化が確認できる程度である。劣化領域が印加部から遠ざかることで被測定面積も大きくなる可能性があるが、劣化領域そのものが広いわけではないので、分極抵抗法を用いて評価する場合には、こ

のようなことに留意すべきと考える。

(2) 不動態皮膜の劣化領域の大小について

本小節では、不動態皮膜の劣化領域の大小が被測定面積および電流伝播に及ぼす影響の把握を目的として解析を行った。劣化部における分極抵抗比を 1/2 とし、不動態皮膜の劣化領域の大きさは、前小節の 100 mm に対して、250 mm と 2.5 倍の大きさとした。なお、この劣化領域が 250 mm の箇所については、供試体の中央(解析メッシュでは右端)から 50 mm ならびに 250 mm の 2 パターンを考えた。なお、その他のパラメータについては、すべて前小節と同じものを用いている。

劣化区間が 50-300 mm の図-16 と劣化区間が 100-200 mm の図-10 を比較すると、前者については鉄筋下部への電流の回りこみがやや顕著となっているが、両者にそれほど大きな差は認められない。他方、劣化区間が 250-500 mm の図-17 の場合は、印加された電流はコンクリート部を伝播してより広く遠方に拡散して

図-16 電流密度分布図 (分極抵抗劣化領域 50-300 mm)

図-18 電流密度分布図 (70 週, 劣化速度大)

図-17 電流密度分布図 (分極抵抗劣化領域 250-500 mm)

図-19 電流密度分布図 (70 週, 劣化速度小)

表-2 不動態皮膜の劣化の経時変化

養生期間 (週)	不動態皮膜の分極抵抗 R_p ($\text{k}\Omega\text{cm}^2$)	
30	1000	
50	708.8	735.3
70	417.7	470.6
90	126.5	205.9
98	10.0	100.0

図-20 電流密度分布図 (98 週, 劣化速度大)

図-21 電流密度分布図 (98 週, 劣化速度小)

いる様子が明確となっており、明らかに前者の 2 つとは異なる。これより、劣化区間が長くなっても、被測定面積が大きく変化するとは限らず、むしろ、印加部と劣化箇所に電流伝播は依存し、劣化区間が短くても、それが印加部から遠方にあると、被測定面積は、見かけ上、大きく評価される可能性があることが示唆されている。

(3) コンクリート抵抗率と不動態皮膜の分極抵抗の経時変化について

本小節では、コンクリートの乾燥や不動態皮膜の劣化、すなわち、コンクリート抵抗率や不動態皮膜の分極抵抗が時間とともに変化した場合における被測定面積および電流伝播に及ぼす影響を把握することを目的に解析を行った。なお、コンクリートの抵抗率の経時変化については表-1 に、また、不動態皮膜の分極抵抗の経時変化については表-2 に従うものとした。この解析では、これまでの解析と異なり不動態皮膜の劣化は部

分的なものではなく、全面劣化を想定している。なお、98 週後に分極抵抗が $1000 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ から $10 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ へ変化する方が、 $1000 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ から $100 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ へ変化する場合よりも劣化速度が速いことを意味している。

全ての週の解析結果を掲載することは、紙面の関係上難しいため、本論文では 70 週時における電流の電流密度分布図を図-18 と図-19 に、また、98 週時における電流密度分布図を図-20 と図-21 に示す。いずれも、前者の方が後者よりも腐食速度が速い事例となる。70

週時については劣化速度を変化させても、電流の伝播状況に大きな差は認められないが、98 週時では劣化速度の変化によって電流の伝播状況も若干ではあるが変化している様子が伺える。全面劣化をしていることから、特定の地点で電流密度が高まるということは認められない。70 週時と 98 週時を比較すると、前者より後者の方が電流伝搬の広がり方が抑制されていることが伺える。これは、98 週時の方がコンクリートの乾燥が進んで抵抗が大きくなることで、コンクリート中を電流が伝播しにくいためである。これより、養生期間が短い場合は、不動態皮膜の腐食速度にかなりの差があれば電流の伝播状況も変化するかもしれないが、本解析で設定したような変化の程度の下では、養生期間が短い場合に限れば電流伝播に大きな差がないものの、時間経過とともに少しずつ差が生じることが示唆されている。

(4) コンクリート抵抗率と不動態皮膜の分極抵抗の経時変化および劣化箇所による比較

前小節と同様にコンクリート抵抗率と分極抵抗を経時変化させるとともに、不動態皮膜の劣化箇所の違いが被測定面積および電流伝播に及ぼす影響を把握することを目的に解析を行った。不動態皮膜の劣化箇所は小節 (1) と同様とし、100 mm の劣化領域を供試体の中央（解析メッシュでは右端）から 100 mm（100～200 mm 区間、図-8 のクリーム色の領域）、200 mm（200～300 mm 区間、図-8 の緑色の領域）、300 mm（300～400 mm 区間、図-8 の黄色の領域）ならびに 400 mm（400～500 mm 区間、図-8 の青色の領域）の箇所に設けたケースである。なお、不動態皮膜の劣化による分極抵抗の経時変化パターンとしては、1000 kΩcm²（30 週時）から 100 kΩcm²（98 週時）に変化するパターン（劣化速度小）を採用した。図-22～図-25 に 70 週時の、また、図-26～図-29 に 98 週時の電流密度分布図を示す。

70 週時の分極抵抗は 30 週時の半分弱となっているので、コンクリートの乾湿は考慮していない解析において分極抵抗比を 1/2 としたケース（図-10 ならびに図-13 から図-15）と比較が可能となるが、コンクリートの乾湿を考慮しない場合は、不動態皮膜の劣化領域における電流流入が顕著であったのに対し、コンクリートの乾湿を考慮した場合は、それがあまり顕著となっていない。これは、コンクリートが乾燥することで抵抗値が大きくなり、コンクリート中を電流が流れ難くなり、印加直下への電流の流れが卓越することに起因している。コンクリートが乾燥する場合、不動態皮膜の劣化領域の箇所に問わず、被測定面積に差異が出難くなることから、分極抵抗法では、不動態皮膜の劣化を的確に捉えられない可能性がある。

他方、98 週時の分極抵抗は 30 週時の 1/10 まで低減していることから、70 週時と比較すると、不動態皮膜の劣化領域への電流の流れ込みがやや明瞭となっているが、劣化領域が印加部より離れている場合（図-29）、コンクリート中に電流が流れないことに起因して、不動態皮膜の劣化領域への電流の流れ込みは、一転、不明瞭となっている。このように、不動態皮膜のみに劣化が生ずる場合と比較して、不動態皮膜の劣化とコンクリートの乾燥がともに生じると、電流の伝播状況は非常に複雑になることがわかる。

6. インピーダンス特性曲線

文献によれば²⁸⁾、インピーダンス特性曲線を作成することで、コンクリート抵抗率や分極抵抗が電流分散状況および被測定面積に及ぼす影響を考慮できるようになり、鉄筋腐食診断器により測定される見かけの分極抵抗 R_p' から真の分極抵抗 R_p を従来よりも精度よく評価できるようになる。そこで、本研究においても、上述した解析に関して、インピーダンス特性曲線を作成することとした。

コンクリート抵抗率 ρ とかぶり t の積がかぶりコンクリートの抵抗 R_s ($R_s = \rho \times t$)、真の分極抵抗 R_p を被測定面積 A で割った値が見かけの分極抵抗 R_p' ($R_p' = R_p \times A$) である。真の分極抵抗 R_p とかぶりコンクリートの抵抗 R_s の和を全抵抗 R_T ($R_T = R_p + R_s$)、見かけの分極抵抗 R_p' とかぶりコンクリートの抵抗 R_s との和を見かけの全抵抗 R_T' ($R_T' = R_p' + R_s$) とし、全抵抗 R_T ならびにみかけの全抵抗 R_T' をそれぞれかぶりコンクリートの抵抗 R_s で割った値をそれぞれ横軸ならびに縦軸にプロットすることで、インピーダンス特性曲線を得ることができる²⁸⁾。

一般に、実験により得られたインピーダンス特性曲線では、不動態皮膜ならびにコンクリートの非均一性を評価することはできないため、本研究の解析より得られたインピーダンス特性曲線と実験により得られたインピーダンス特性曲線を比較することで、不動態皮膜の劣化やコンクリートの乾燥等がインピーダンス特性曲線に及ぼす影響を検討する。

図-30 は、塩化物を添加して鉄筋腐食を促進させた実験（青色系統）と、何も添加しない実験（赤色系統）におけるインピーダンス曲線である³⁵⁾。実験では、鉄筋腐食を促進させた実験（青色系統）の場合、 R_T/R_s の値は 1.0 から 2.0 の間にあり、何も添加しない実験（赤色系統）の場合、 R_T/R_s の値はほとんどが 3.0 以上となっているというように添加物の有無によってはっきりとタイプが分かれており、通常、このような整理によって鉄筋の腐食等が議論されることが多い。

図-22 電流密度分布図 (70 週, 劣化領域 100-200 mm)

図-26 電流密度分布図 (98 週, 劣化領域 100-200 mm)

図-23 電流密度分布図 (70 週, 劣化領域 200-300 mm)

図-27 電流密度分布図 (98 週, 劣化領域 200-300 mm)

図-24 電流密度分布図 (70 週, 劣化領域 300-400 mm)

図-28 電流密度分布図 (98 週, 劣化領域 300-400 mm)

図-25 電流密度分布図 (70 週, 劣化領域 400-500 mm)

図-29 電流密度分布図 (98 週, 劣化領域 400-500 mm)

図-31 は、以下に示すような解析例におけるインピーダンス曲線である．ここでは、不動態皮膜の劣化箇所を小節 (1) と同様とし、100 mm の劣化領域を供試体の中央 (図-8 の右端) から 100 mm (100～200 mm 区間で図-8 のクリーム色の領域)、200 mm (200～300 mm 区間で図-8 の緑色の領域)、300 mm (300～400 mm 区間で図-8 の黄色の領域) ならびに 400 mm (400～500 mm 区間で図-8 の青色の領域) の箇所に設けている．また、この劣化箇所における分極抵抗比は 1/10 で固定とし、

分極抵抗の経時変化 (劣化速度) は考慮していないが、コンクリートについては乾燥を考慮し、コンクリートの抵抗率の経時変化については表-1 に従うものとしている．インピーダンス曲線をプロットするにあたっては、真の全抵抗 (R_T , 横軸) と見かけの全抵抗 (R'_T , 縦軸) を、分極抵抗法における測定範囲である 2 つの対極センサー間のコンクリートの抵抗 R_s で除すことになる．しかしながら、この処理をするにあたって、同じ 98 週時の解析結果でも、印加直下のコンクリートの抵抗

図-30 実験により得られたインピーダンス特性曲線³⁵⁾

図-31 分極抵抗比 1/10 の下でコンクリートの乾燥を考慮した解析のインピーダンス特性曲線

図-32 小節 (3) より得られた劣化速度に着目したインピーダンス特性曲線

図-33 小節 (4) より得られた劣化箇所に着目したインピーダンス特性曲線

率（本解析では $\rho=430 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ ）を用いる場合と鉄筋直上のコンクリートの抵抗率（本解析では $\rho=40 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ ）を用いる場合では、大きくグラフ形状が異なってくる。それを示したのが図-31である。実際には、下限値である $\rho=40 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ と上限値である $\rho=430 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ の間の値、つまり材料としての代表値を用いるべきかもしれないが、それは場所やコンクリートの材齢によって異なる可能性もあるため、その評価によってはインピーダンス曲線にプロットされる点はばらつくことが予想される。図-31はそれを示した例である。全抵抗あるいは見かけの抵抗を大きな値の R_s で除すとプロット点が左下方にズレるため、 $\rho=430 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ にて処理した場合（○の記号系）は $\rho=40 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ にて処理した場合（◇の記号系）よりも左下方にプロットされる。特に、 $\rho=430 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ にて処理した場合、 R_T/R_s の値はすべて 3.0 を下回っており、養生期間が増すにつれて左にシ

フトし、70 週以降は 2.0 を下回っている。図-30と比較すると、 R_T/R_s の値が 2.0 を下回った場合は「塩化物を添加して鉄筋腐食を促進させた実験（青色）」が示す分布に近くなる。

図-32は、小節 (3)、つまりコンクリートの乾燥を考慮してコンクリートの抵抗率を変化させるだけでなく、不動態皮膜の劣化を考慮して分極抵抗を初期の $1000 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ から $10 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ （劣化速度大）まで、あるいは $100 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ （劣化速度小）まで低下させた事例について、各週（養生期間 30 週、50 週、70 週、90 週、98 週）ごとの解析結果を基に作成したインピーダンス曲線である。なお、この事例では、不動態皮膜は全面劣化しているものとしている。図では、横軸の R_T/R_s が大きい方から養生期間 30 週、50 週、70 週、90 週、98 週

となっている。図より、劣化速度が速い場合（赤点）と遅い場合（青点）を比較すると、コンクリートの乾燥と不動態皮膜の劣化が進行している 90 週後や 98 週後では、劣化速度の速い場合（赤点）は同じ R_T/R_s の値のときの R'_T/R_s の値が大きくなっているが、70 週以前だと、劣化速度による左派ほとんど無い。70 週後の電流密度分布である図-18（劣化速度大）と図-19（劣化速度小）を比較すると、両者にそれほど大きな差は無い。これは 70 週の時点では、両ケースにおける分極抵抗にほとんど差がないが（表-2 を参照）、90 週、98 週となると両者に差が生じ、図-20（劣化速度大）と図-21（劣化速度小）に示すように、電流の伝播状況が変化している。劣化速度が速い場合（赤点）の方が劣化速度が小さい場合（青点）よりも印加部直下に電流が集中していることから被測定面積 A が小さく、見かけの分極抵抗 R'_T は大きくなるため、劣化速度が速い場合（赤点）では、図-32 に示す通り、プロット点が上部に位置している。なお、50 週以降は R_T/R_s の値が 2.0 を下回っており、図-30 と比較すると、「塩化物を添加して鉄筋腐食を促進させた実験（青色）」が示す分布に近くなる。

図-33 は、小節 (4)、つまりコンクリートの乾燥を考慮してコンクリートの抵抗率を、また、不動態皮膜の劣化を考慮して分極抵抗を変化させるが、その不動態皮膜の劣化領域は全面的ではなく、部分的であるとして解析した場合のインピーダンス曲線である。凡例は、劣化領域の箇所を表している。なお、この場合も、図の横軸の R_T/R_s が大きい方から養生期間 30 週、50 週、70 週、90 週、98 週となっている。図より、養生期間が短い場合は、劣化箇所による差はほとんどない（点は重なっているため、青色しか見えていない）が、この場合も 90 週、98 週となると、劣化箇所によって値が若干異なっていることがわかる。しかしながら、上述した劣化速度を変化させた場合の変化量と比較すると、劣化箇所による影響はあまり大きくないことがわかる。なお、この場合も 50 週以降は R_T/R_s の値が 2.0 を下回っており、これも図-30 と比較すると、「塩化物を添加して鉄筋腐食を促進させた実験（青色）」が示す値分布とに近くなる。

これらの結果より、図-30 の青点に関する回帰式と鉄筋の腐食等に強い相関があるとは限らず、図-31 から図-33 にて考察したように、鉄筋の腐食（本研究では不動態皮膜の劣化）だけではなく、コンクリートの乾燥にともなうコンクリートの抵抗率の変化もまた、インピーダンス曲線に大きな影響を及ぼしていると思われる。したがって、コンクリートの乾燥による影響を加味せずに鉄筋の腐食評価をする際には議論の必要があるものと思われる。一方、まだ解析事例が極めて少

ないことから、今後、解析パターンを増やしてパラメトリックスタディをする他、実験との比較を通して、解析の妥当性を深めつつ、最終的には、コンクリートの乾燥や不動態皮膜の劣化がインピーダンス曲線に与える影響を詳細に検討する必要がある。

7. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート構造物に用いられる鉄筋の腐食検査・診断法の 1 つである分極抵抗法に着目し、その適用性等の議論を行うために、不動態皮膜の劣化による分極抵抗の非均一性ならびにコンクリートの乾湿にともなう抵抗率の非均一性が電流分散状況に及ぼす影響について調べることを目的とし、電流伝播に関する 3 次元有限要素解析を行った。解析にあたっては、不動態皮膜における分極抵抗の値、劣化箇所とその大きさ、そしてコンクリートの抵抗率を変化させてパラメトリックスタディを実施した。その結果、不動態皮膜における分極抵抗の値、劣化箇所とその大きさもさることながら、コンクリートの乾湿にともなう抵抗率の変化が供試体中を流れる電流の分散状況に大きな影響を与えることが判明した。また、コンクリートの乾湿にともなう抵抗率の変化等を考慮に入れない場合、鉄筋腐食の程度等の把握が複雑となる可能性があることも示唆された。しかしながら、まだ、解析数が十分でないことに起因して普遍的な知見を得るに至っていないことから、実験等との比較も行なって解析の妥当性を検証し、その上で、分極抵抗法の利活用できる状況や適用範囲等をより詳細に議論する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書，pp.28-29，2014.
- 2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 維持管理編，pp.102-104，2001.
- 3) 枝広英俊，十代田知三，竹内昌彦，山本祐基子：自然電位法によるコンクリート中の鉄筋の腐食評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.311-316，1998.
- 4) 中村英佑，渡辺博志，古賀裕久，中村雅之，井川一弘：塩害環境下にあるコンクリート構造物への自然電位法の適用に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.263-275，2008.
- 5) 福山聡子，野口貴文，兼松学，林永哲：交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食の非破壊検査に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.185-186，2006.
- 6) 斯波明宏，樋口正典：電気化学的鉄筋腐食測定法の適用性に関する研究，三井住友建設技術研究所報告，第 5 号，pp.79-84，2007.
- 7) 松村卓郎，金津努，石田博彰：コンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査法の開発－2 種類の周波数を用いた分極抵抗法の適用性－，電力中央研究所報告，U920523，22p，1993.
- 8) 露口雄次，町田篤彦：直流比抵抗法を用いた RC 構造物の内部推定に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.641-656，2006.

- 9) 露口雄次, 町田篤彦: 直流比抵抗法を用いたコンクリート構造物の内部推定に関する基礎的研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, 5-590, pp.1179-1180, 2005.
- 10) 露口雄次, 町田篤彦: 直流比抵抗法を用いた鉄筋腐食度推定手法の実用化, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, 5-016, pp.31-32, 2007.
- 11) 露口雄次, 町田篤彦: 鉄筋腐食度推定に関する電気探査法と既存測定法の比較検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, 5-176, pp.351-352, 2008.
- 12) 露口雄次, 町田篤彦: 電気探査法を応用した RC 構造物の鉄筋位置と腐食状態の推定, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.42-61, 2008.
- 13) 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.
- 14) 独立行政法人土木研究所: コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書—自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断—, pp.5-37, 2003.
- 15) 横田優, 上田隆雄: 建設後 24 年経過した地下道側壁の鉄筋腐食モニタリング結果について, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-467, pp.936-937, 2000.
- 16) 横田優: 建設後 36 年経過した RC 造開水路側壁の腐食モニタリング結果について, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.20, No.1, pp.185-190, 1998.
- 17) 横田優: 交流インピーダンス測定による水中浸漬に伴うコンクリート中にある鉄筋の腐食進行評価, 日本材料学会四国支部第 8 回学術講演会講演論文集, S5-16, pp.31-32, 2010.
- 18) 横田優, 上田隆雄: 分極抵抗法に基づく鉄筋腐食非破壊検査方法の実構造物への適用試験, 土木学会四国支部第 5 回技術研究発表会講演概要集, V-14, pp.340-341, 1999.
- 19) 横田優, 浮田和明, 幸英昭: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.241-246, 1991.
- 20) 横田優, 松場新吾, 松田耕作: 室内気中にて長期養生したコンクリート供試体の鉄筋腐食に関する考察, 土木学会四国支部第 16 回技術研究発表会講演概要集, V-15, pp.297-298, 2010.
- 21) 横田優, 河野清: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食診断について, 土木学会第 49 回年次学術講演会, V-88, pp.176-177, 1994.
- 22) 濱田秀則, 平崎敏史, 山路徹, Tarek U.M.: コンクリート中鉄筋の電気化学的計測に影響を及ぼす要因に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, pp.57-67, 2004.
- 23) 鈴木僚, 西村次男, 加藤佳孝, 横田弘, 岩波光保, 加藤絵万: 測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響, 生産研究, 59 巻, 3 号, pp.9-10, 2007.
- 24) 松岡和巳, 松井繁之: インピーダンス特性曲線を用いた分極抵抗値の逆推定法の適用性評価, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, V-079, pp.157-158, 2003.
- 25) 松岡和巳, 松井繁之: 交流インピーダンス測定におけるコンクリート中電流分布特性に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-169, pp.337-338, 2002.
- 26) 松岡和巳, 松井繁之: 数値解析を用いた交流インピーダンス測定値の定量的評価法について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.839-844, 2003.
- 27) 岡田英哲, 松岡和巳, 大西弘志, 松井繁之: 分極抵抗測定値に及ぼす各種パラメータの影響評価, 土木学会第 59 回年次学術講演会概要集, 5-268, pp.533-534, 2004.
- 28) 金田尚志, 松岡和巳: BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1715-1720, 2011.
- 29) 吉田秀典, 川上 純, 荒木志帆, 横田 優: 電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究, 土木学会論文集 A2, Vol.69, No.2, pp.I-667-I-688, 2013.
- 30) 北峯博司, 関博, 金子雄一: コンクリートの含水率と抵抗率に関する実験的研究, 土木学会第 45 回年次学術講演会, V-374, pp.774-775, 1990.
- 31) 生田周史, 中川元宏, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 各種要因がコンクリートの比抵抗に与える影響に関する実験的研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.187-188, 2004.
- 32) 金田尚志, 松岡和巳, 嶋野慶次, 青木優介: コンクリート表面から深さ方向の比抵抗の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2098-2103, 2014.
- 33) 松浦聰: 橋梁保全のための電気防食工法の施工, 2010 年第 31 回夏季研修会論文, 藤井基礎設計事務所, pp.85-96, 2011.
- 34) 小川勤, 伊東賢伸, 梅木芳人, 島本龍, 坂詰義幸, 横田優: 分極抵抗法の原子力関連施設への適用性に関する研究 (その 1 試験計画と評価方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1321-1322, 2012.
- 35) 坂詰義幸, 伊東賢伸, 小川勤, 梅木芳人, 島本龍, 横田優: 分極抵抗法の原子力関連施設への適用性に関する研究 (その 2 インピーダンス特性曲線の作成と測定結果の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1323-1324, 2012.

(2016. 6. 24 受付)

STUDY ON INFLUENCE OF DEGRADATION OF PASSIVATION FILM OR WETTING AND DRYING OF CONCRETE ON PROPERTY OF ELECTRICAL CONDUCTION

Hidenori YOSHIDA and Shuhei OHMOTO

Recently, the polarization resistance method is highly noticed as a non-destructive test method to evaluate the corrosion rate of rebar in concrete structures. The corrosion rate can be estimated from the apparent polarization resistance and the polarized area. The polarized area is often evaluated by numerical methods such as boundary element method. The material heterogeneity such as rebar corrosion or altered concrete is one of the most important affectors on the current propagation in a reinforced concrete. However, it is not well evaluated by boundary element method. Thus, in this study, finite element method is employed to evaluate the current propagation. In the results, the properties of current propagation are strongly affected by the material heterogeneity.