

非均一性が鉄筋コンクリートの電流伝導に及ぼす影響に関する研究

STUDY ON INFLUENCE OF HETEROGENEITY ON CURRENT PROPAGATION IN
REINFORCED CONCRETE吉田 秀典¹⁾, 大本 修平²⁾, 横田 優³⁾

Hidenori YOSHIDA, Shuhei OHMOTO and Masaru YOKOTA

1) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)

2) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s12g403@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)

3) 元四国総合研究所

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.

Key Words: Material heterogeneity, Current propagation, Finite element method

1. 緒言

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。その時代に作られたコンクリート構造物は、建設後 50 年以上経過しているものが多く、今後、少なからず更新せざるを得ないものも出てくるのが予想される⁽¹⁾。実際に、2012 年 12 月に中央自動車道の笹子トンネルにおいてトンネル天井板崩落事故が発生し、多くの死傷者を出した。また、国土交通省のまとめでは、全国にある 40 万余りの道路橋のうち、寿命と言われる築 50 年を迎える道路橋は現在 18% 余りだが、10 年後には 43%、20 年後には 67% に達する。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⁾。

コンクリート構造物の代表的な劣化現象としては塩害や中性化、アルカリ骨材反応などがあるが、中でも塩害による鉄筋腐食はコンクリート構造物の耐久性を低下させる。本来、鉄筋はコンクリートなどの高アルカリ環境下では鉄筋表面に不動態皮膜を形成し、腐食は発生しにくい。コンクリートの水和反応に伴う自己収縮や乾燥収縮にともない生じるひび割れから水や二酸化炭素、塩化物イオンなどがコンクリート内に侵入することにより鉄筋腐食を誘発する。

コンクリート構造物の維持管理では、問題が顕在化してから対応する事後対応がほとんどで、これは、外見よりコンクリート中の鉄筋の腐食状態を把握することが極めて難しいからである。つまり、コンクリート表面のひび割れの発生やさび汁の流出によってはじめて鉄筋の腐食が認識されるのが一般的で、鉄筋腐食がさらに進行すると有効な補修や補強が困難な状態に陥る場合もある。したがって、できる限り早期の段階でコンクリート中の鉄筋腐食の状態をモニタリングする技術が強く望まれており、それを受けて腐食モニタリングに関する研究が多く行われている。

コンクリート中にある鉄筋の腐食検査・診断法として、非破壊検査法がある。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、特に、電気化学的手法が多く用いられている。電気化学的手法には自然電位法や分極抵抗法、これらを複合したもの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、鉄筋の腐食やコンクリートの乾湿を定量的に評価できる⁽³⁾ことからこの手法が注目されている。

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的研究に分けられる。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⁽⁴⁾や横田ら^(5, 6, 7, 8)によって検討されている。横田らは約 2 年 9 か月にわたって屋外暴露した鉄筋コン

クリート供試体を対象に3電極方式による交流インピーダンスを行った結果、分極抵抗と腐食減量との間に相関性を確認し、分極抵抗法による腐食速度の定量的評価の可能性を示唆した⁽⁹⁾。さらに横田らは、5日間水中浸漬した供試体の分極抵抗等の経時変化を記録し、試験終了後供試体を割裂し計測結果と鉄筋の腐食状況の目視観察との比較を通して、分極抵抗法による鉄筋腐食評価のさらなる有効性を検討した⁽¹⁰⁾。

分極抵抗法においては、分極抵抗測定器で測定される値は見かけの分極抵抗であり、真の分極抵抗ではない。真の分極抵抗は、見かけの分極抵抗に電流の流れる範囲(被測定面積)を乗じることで得られる。そのため、電流の流れる範囲を限定する方法としてガード対極を用いて電氣的にガードする方法(2重対極方式)が後藤らによって提案されている。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(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⁽¹¹⁾。しかしながら、電流分散範囲は鉄筋腐食の箇所やコンクリートの乾湿の影響を受けることから^(12, 13)、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から、多数のケースについて正確な電流分散状況を把握するためには数値解析が有効と言えよう。

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^(14, 15, 16, 17, 18)。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⁽¹⁹⁾。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も考えられることから、材料の非均一性を念頭に入れると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質性の影響を検討するには至っていない⁽²⁰⁾。

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^(21, 22)、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、コンクリートは様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乾燥し、その付近の乾燥が局所的に進むことが想定される。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られられる。そこで本研究では、鉄筋腐食の非均一性ならびにコンクリートの乾湿にもなる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も調べることを目的とする。

2. 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)を境界条件の下で解くことになるが、本研究では、これらを離散化し、有限要素解析を行う。

なお、点A(r_A)から点B(r_B)までの電場 E の線積分

$$\int_A^B E \cdot dl = \phi(r_A) - \phi(r_B) \quad (9)$$

は経路によらず2点間の電位差となり、また、 $E = \rho J$ (ρ は電気抵抗率、 J は電流密度)であるから、解析では、電氣的

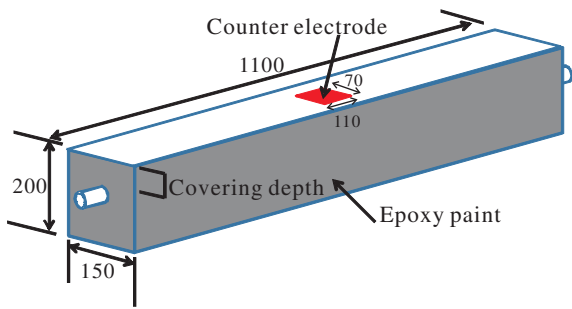


Fig. 1 Schematic specimen

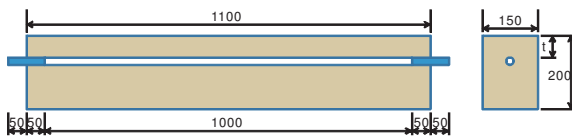


Fig. 2 Specimen size

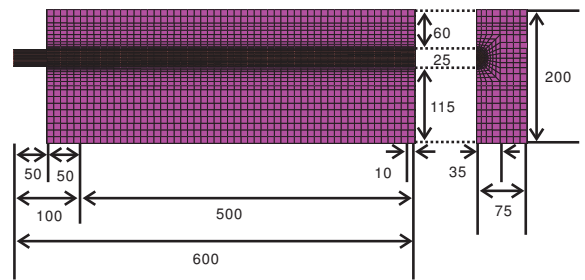


Fig. 3 Analysis area (D25, covering depth 60mm)

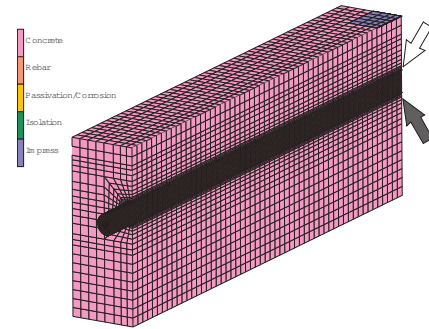


Fig. 4 Analysis mesh (D25, covering depth 60mm)

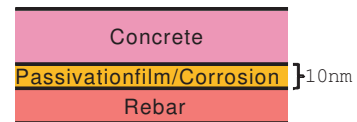


Fig. 5 Passive film

な抵抗を有する有限体（コンクリート，不動態皮膜，鉄筋など）の境界部に電氣的ポテンシャルである電位を与えることで，有限体内部の電流分布を求めることとなる。

3. 有限要素解析

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（Fig.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，分極抵抗（解析で与える分極抵抗は真の分極抵抗で，以降，単に分極抵抗とする）およびコンクリートの電気抵抗率という影響因子を変化させて3次元有限要素解析を実施し，これら影響因子が電流分散に及ぼす影響の把握を行う。なお，鉄筋が腐食すると不動態皮膜が破壊されて分極抵抗が小さく，また，コンクリートは乾燥にともなって電気抵抗率が大きくなる。

3.1. 供試体寸法

Fig.1, Fig.2に示すようなコンクリート供試体を用いる。なお，単位はmmである。なお，本解析では鉄筋径を25mm（図には示していない），かぶり（図中の t ）を60mmとしている。以降に示すメッシュについても界面皮膜部（不動態皮膜部）を除き，長さの単位はmmである。

3.2. 解析領域と解析メッシュ

Fig.1, Fig.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，Fig.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Fig.3とFig.4に示す。Fig.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/劣化状態）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Fig.5に示すように，鉄筋要素，コンクリートと鉄筋の境界部要素，そしてコンクリート要素を配置し，Fig.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100mm

を絶縁部（図中，両端部の網掛け部分，絶縁要素）としている。なお，総節点数は31,784，総要素数は28,392である。

3.3. 非均一領域の設定

本研究では，鉄筋が部分的に腐食した場合を想定するため，Fig.3に示す鉄筋の絶縁部分（左端部の50mm+50mm=100mmの領域）を除く500mmの領域を5分割し，絶縁部分に近接する100mm区間のみが腐食している場合をcase1，次の100mm区間のみが腐食している場合をcase2，供試体中央（Fig.3に示す解析メッシュでは右端）の100mm区間のみが腐食している場合をcase5というように定め，合計5つ解析ケース（case1~case5）を用意した。定腐食部分では，健全部分の不動態皮膜の分極抵抗（本解析では，不動態皮膜が健全である場合は $1,000 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ ）の10分の1（ $100 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ ）として解析に用い，周方向に一樣な腐食とした。参考のために，不動態皮膜の腐食のない解析ケースをcase6とした。解析では，次式を用いて，分極抵抗 $R_{ct} = R \times A$ を抵抗率 ρ に換算し，解析パラメータとした。

$$\rho = \frac{R \times A}{l} = \frac{R_{ct}}{l} \quad (10)$$

ここで， R は抵抗（ Ω ）， l は不動態皮膜の厚さ， A は測定面積である。なお，コンクリートの抵抗率は，コンクリートとして一般的な $40 \text{ k}\Omega\text{cm}$ とし，また，不動態皮膜は2nm~6nmというのが一般的であるが⁽²³⁾，本解析では，やや大

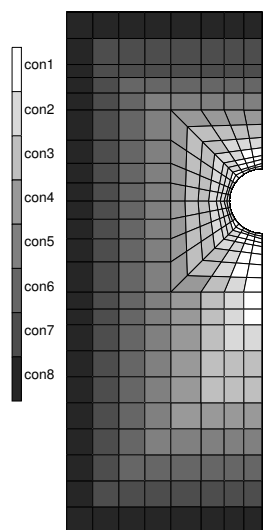


Fig. 6 Concrete element with various resistant rate

きめに 10 nm とした。

上記の解析ケースは、恒温恒湿室等でコンクリートの乾燥を防いだ場合に近い条件となるが、実際に屋外等に打設されたコンクリートの場合は温度収縮や乾燥収縮にともなってコンクリートの表面にひび割れ（微細なクラック）が発生し、こうしたひび割れを介してコンクリート内の乾燥が進む。それは、特にコンクリートの表面で顕著となる。前述のコンクリートの抵抗率 $40 \text{ k}\Omega\text{cm}$ という値は、乾燥が進んでいない場合に設定される値であるが、文献⁽²⁴⁾によれば、時間経過とともに乾燥が進み、この値は大きくなる。本解析では、この文献を参考に、供試体は 98 日以上経過したものと考え、Fig.6 に示すように、供試体表面の深さに対応して要素のグルーピング（図中、con1～con8）を行った。例えば、コンクリートの側面から 10 mm 程度の深さまで（con8）は $430 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 10 mm から 20 mm 程度まで（con7）は $305 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 20 mm から 30 mm 程度まで（con6）は $180 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 30 mm から 40 mm 程度まで（con5）は $152 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 40 mm から 45 mm 程度まで（con4）は $124 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 45 mm から 55 mm 程度まで（con3）は $96 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、深さ 55 mm から 65 mm 程度まで（con2）は $68 \text{ k}\Omega\text{cm}$ 、それより深部（con1）では $40 \text{ k}\Omega\text{cm}$ となっている。本解析では、この値をそのまま用いて解析を行い、その解析ケースを case7 とした。なお、case7 では鉄筋の腐食（不動態皮膜の腐食）は想定していない。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でこれを用いた。

3.4. 境界条件

境界条件に関しては、供試体上部（Fig.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 0V とした。なお、実際の測定器のセンサ部は円形（断面積：約 72 cm^2 ）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。



Fig. 7 Normalized current density distribution (case1)

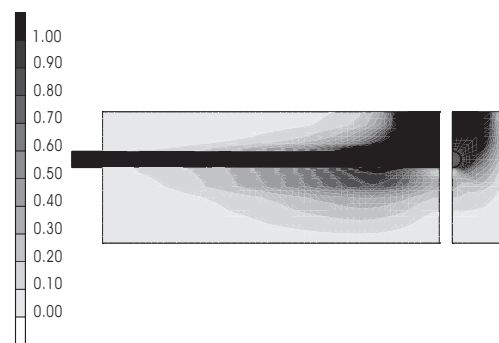


Fig. 8 Normalized current density distribution (case7)

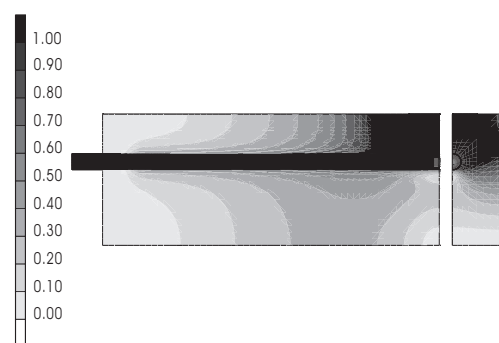


Fig. 9 Normalized current density distribution (case6)

3.5. 解析結果および考察

解析結果として、まず、コンクリート内における電流密度の 3 成分の二乗平均平方根を取った値（以降、単に電流密度と称する）について、印加直下の電流密度で正規化した分布図を Fig.7 から Fig.9 に示す。紙面に限りのあることから、すべての解析結果を示すことは難しいため、case1（不動態皮膜の腐食のみを考慮、Fig.7）、case7（コンクリートの乾燥のみを考慮、Fig.8）、そして case6（いずれも考慮無し、Fig.9）に限って示している。case1（Fig.7）は絶縁部分に近接した 100 mm 区間のみが鉄筋が腐食し、不動態皮膜が健全である場合の分極抵抗値 ($1,000 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$) の 10 分の 1 ($100 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$) となっているため、供試体中央で印加された電流は、抵抗が大きい印加直下よりも抵抗が小さい腐食部分に流れ込むような挙動を示している。鉄筋腐食は起こらずにコンクリートだけが乾燥した case7（Fig.8）では、コンクリート中を電流が流れるよりも印加部直下の鉄筋に向けた流れが卓越している様子が伺える。不動態皮膜の腐食が case1 のように印下部より遠方の場合は上述したような電流分散を呈するが、これが

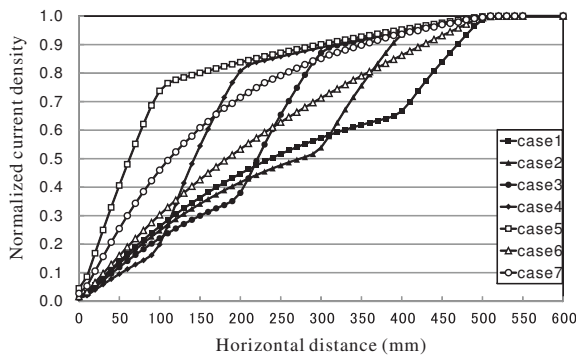


Fig. 10 Normalized current density (center)

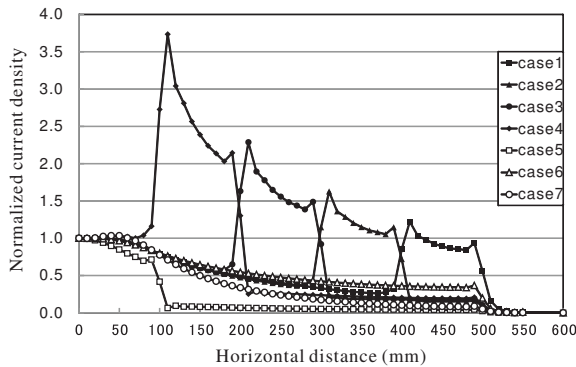


Fig. 11 Normalized current density (upperside)

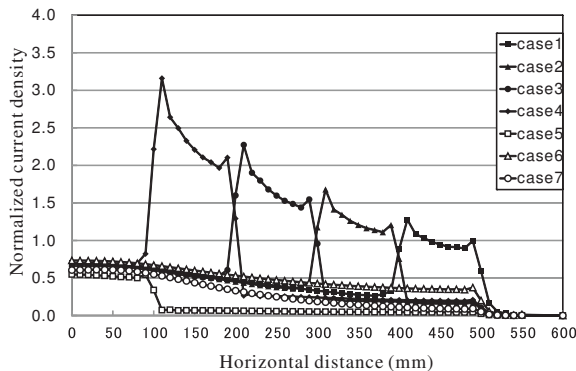


Fig. 12 Normalized current density (downside)

印加部、つまり供試体の中央に近くなると case7 に類似した挙動になることも想定され、その場合、分極抵抗法を用いて計測しただけでは、得られた結果が不動態皮膜の腐食に影響されたのか、それとも、コンクリートの乾燥に影響されたのか区別がつかないので、別途、コンクリート中の相対湿度等を計測する必要があるものと思われる。なお、鉄筋の腐食ならびにコンクリートの乾燥の両者とも考慮にいれない case6 (Fig.9) では、ある程度はコンクリート中を電流が流れ、特定の鉄筋部位に電流が集中するような挙動も確認されない。

つぎに、印加直下の点を原点として鉄筋軸方向に距離をとり、その距離 (x 軸) と電流密度 (y 軸) の関係を Fig.10 から Fig.12 に示す。Fig.10 は鉄筋中央、Fig.11 は鉄筋上部 (Fig.4 の白抜き矢印が示す箇所)、Fig.12 は鉄筋下部 (Fig.4 の黒塗り矢印が示す箇所) における電流密度をプロットしている。なお、鉄筋中央では末端の電流密度で、鉄筋上部と下部については、原点における鉄筋上部の電流密度で正規化した「正

規化電流密度」として y 軸にプロットしているため、Fig.10 では末端で正規化電流密度は 1 を、また、Fig.11 では原点で正規化電流密度は 1 となっている。鉄筋中央における電流密度 (Fig.10) については、不動態皮膜の腐食がある場合 (case1 ~ case5)、腐食部における抵抗値が小さいために、その付近においてコンクリートから鉄筋に向かう流れが卓越し、電流密度も大きくなる。一方、不動態皮膜の腐食もコンクリートの乾燥もない場合 (case6) にはそのような現象が見られず、変曲点を有しない曲線となっている。コンクリートの乾燥がある場合 (case7) では、case6 と同様に不動態皮膜の腐食がないため変曲点を有しない曲線となっているという類似点を有する。しかしながら、Fig.8 と Fig.9 を比較すると鉄筋近傍のコンクリート部分における電流の流れに差異があり、このため Fig.10 では両者に差がある。Fig.9 より、case6 についてはコンクリート全体が乾燥していないので、コンクリートの抵抗率はそれほど大きくなく、電流は印加部から下方の鉄筋に向けて流れる成分と、表層から鉄筋軸方向へ、あるいは周方向へと広く拡散し、やがて鉄筋へと流入している。case7 はコンクリートが乾燥し、コンクリートの抵抗率も表層近傍では大きく、それゆえに電流はコンクリート表層付近には流れ難いので、電流はあまり拡散せずに印加部直下に流入している。これに起因して、case7 では case6 よりも原点より、つまり左にシフトした曲線を呈している。

鉄筋上部 (Fig.11) と下部 (Fig.12) については、電流が直接上方から鉄筋に流入する量の方が、鉄筋を回り込んで下方から鉄筋に流入する量より多いため、正規化電流密度は上部の方が大きな値を示すが、大きさの差を除けば、同じ解析ケースでは、鉄筋の上下で類似した挙動を示している。両図においても、Fig.10 に関する考察と同様、不動態皮膜の腐食がある場合 (case1 ~ case5)、腐食部における抵抗値が小さいために、その付近においてコンクリートから鉄筋に向かう流れが卓越している様子が確認できる。また、その値は、腐食が中央に近くなるにしたがって大きくなるが、印加部直下が腐食している場合 (case5)、電流は印下部直下に集中するため、その付近の電流密度は正規化した原点の電流密度とほぼ同じであり、値が 1 を超えるようなことはない。他方、腐食区間を過ぎると、一気に電流密度が小さくなっていることが伺える。不動態皮膜の腐食がない case6 や case7 では上述したような現象は確認されない。case6 と case7 の差は、上述した鉄筋中央部の場合と概ね同じことに起因しており、両図においても、case7 は case6 よりも左側にシフトした曲線となっている。

4. 結言

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ためには、鉄筋の腐食などを早い段階で把握する必要があるが、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の状況を外部から把握することは困難である。そこで、鉄筋の腐食検査・診断法として、非破壊検査法の 1 つである分極抵抗法が注目されているが、測定された結果は、鉄筋径やかぶりだけでな

く、鉄筋の腐食している位置やコンクリートの乾燥の程度にも依存する。腐食箇所や乾燥分布にはばらつきがあることから、鉄筋コンクリートの非均一性を考慮した上で、これらが測定結果に及ぼす影響を評価する必要がある。そこで本研究では、鉄筋腐食の非均一性ならびにコンクリートの乾湿ともなう抵抗率の非均一性を考慮し、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して、有限要素解析を実施した。なお、解析では、鉄筋全体の腐食ではなく、不動態皮膜の腐食のみを考慮した。

解析の結果、構造物中の電気分散状況は、コンクリートの乾燥以上に鉄筋腐食に大きな影響を受け、状況によっては、得られた計測結果が、主として鉄筋の腐食によるものか、あるいはコンクリートの乾燥によるものか判断が難しいケースがありうる事が判明した。しかしながら、解析事例もまだ少ないことから、今後、さらに多くのパターンの下、数値解析を実施し、分極抵抗法でどこまで鉄筋腐食の評価が可能であるかを明らかにする必要がある。

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) 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
- (4) 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
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 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
- (8) 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
- (9) 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
- (10) 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
- (11) 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
- (12) 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
- (13) 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
- (14) 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
- (15) 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
- (16) 後藤信弘，松岡和巳，伊藤叡：交流員インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.527-532，1990
- (17) 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
- (18) 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
- (19) 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
- (20) 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.L.667-L.688，2013
- (21) 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
- (22) 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，5-095，pp.187-188，2004
- (23) 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
- (24) 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，ROMBUNNO.1343，2014