論文 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

金田 尚志^{*1}·松岡 和巳^{*2}

要旨: コンクリート構造物中の鉄筋腐食評価方法として分極抵抗法による腐食速度の推定が行われている。 一般に鉄筋直上に対極と照合電極を設置し,対極からコンクリート内の鉄筋に交流電流を印加した際の電位 の変化量から鉄筋の分極抵抗を測定している(交流インピーダンス法)。しかし,対極から鉄筋に流れる電流分 布状況は,かぶり,鉄筋径(鉄筋の表面積),対極と鉄筋との幾何学的位置関係,配筋状態により変化するため, これらの要因を考慮して,見掛けの測定値から鉄筋の真の分極抵抗を推定する必要がある。そこで,境界要 素法(以下 BEM)とインピーダンス特性曲線を用いて各種条件下におけるシミュレーションを行った。 キーワード:鉄筋腐食,分極抵抗法,境界要素法(BEM),電流分布シミュレーション

1. はじめに

コンクリート構造物中の鋼材の腐食状況を推定する非 破壊(微破壊)手法として,自然電位法,分極抵抗法,電 気抵抗法(コンクリート比抵抗の測定)等が適用されてい る。分極抵抗法は,従来から行われている自然電位法と 比較して,測定に時間を要す,実構造物へ適用した場合 に測定精度の確保に経験を要す,或いは測定データの解 釈が難しいという問題がある。しかし,原理的に腐食速 度の評価が可能であることと,過去の研究結果等¹⁾から 分極抵抗と腐食状況の相関性が明らかになってきている ことから,コンクリート中の鉄筋の真の分極抵抗を正確 に推定することができれば,腐食状況を正確に把握する ことが可能となる。

実構造物の分極抵抗測定では、通常、計測が容易なポ ータブル型の測定器が用いられ、例えば、定電流パルス 法に基づく測定機を用いた場合には、高低2周波数を用 いた抵抗の差から分極抵抗が容易に求められる。このよ うな測定器を用いて溶液中の金属片(表面積:Acm²)の分 極抵抗を求める場合を考える。測定は1つの対極を用い た基本的な手法とする。測定に用いる金属片は、対極と 対面する側以外は絶縁シールを施して裏側に電流が回り 込ないようにしておく。対極の大きさは金属片とほぼ同 じで,且つ金属片表面の分極抵抗が一様である場合には、 対極から金属片に向かって測定電流は一様に流れ、金属 表面で電流密度はほぼ均一となる。この場合に分極抵抗 測定器は(1)式により算出した分極抵抗測定値 R_p'(Ω)を 表示する。

$$\mathbf{R}_{\mathrm{p}}'(\Omega) = \mathbf{R}_{\mathrm{LF}}(\Omega) - \mathbf{R}_{\mathrm{HF}}(\Omega) \tag{1}$$

ここに、 R_{LF} は低周波数パルスで測定される分極抵抗 と液抵抗を含んだ全抵抗(Ω)、 R_{HF} は高周波数パルスで測 定した液抵抗(Ω)である。

金属片の腐食評価で意味のある単位面積で定義される

真の分極抵抗 R_p ($\Omega \cdot cm^2$) は式(2)で示すように測定値 R_p ' (Ω)に金属片の表面積 $A(cm^2)$ を乗じることで簡易に 求めることができる。

$$\mathbf{R}_{\mathbf{p}}(\Omega \cdot \mathbf{cm}^2) = \mathbf{R}_{\mathbf{p}}'(\Omega) \times \mathbf{A}(\mathbf{cm}^2)$$
(2)

しかしながら, コンクリート中の鉄筋の分極抵抗を測 定する場合,一般的にコンクリート中の鉄筋は棒状でコ ンクリート表面に置かれたプローブ内部の対極に比べ, 長さが長く、表面積も大である。その結果、対極から内 部の鉄筋に向かって電流は拡散しながら鉄筋に流れてい く。このような電流の拡散状態は、かぶり厚、鉄筋径、 コンクリート比抵抗、鉄筋の分極抵抗等の因子により変 化するため、上記の溶液中における実験のように単純に 測定値×表面積(被測定面積)で鉄筋の真の分極抵抗 R_nを 求めることはできない。この問題を解決するために2重 対極式測定法 2)が考案された。2 重対極式とは、測定用 対極を取り巻くようにガードリング電極を設置してガー ドリング電極からコンクリート内部の鉄筋に犠牲電流を 流し、対極からの測定電流を対極直下に集中させ、鉄筋 の被測定面積を限定しようとする手法である。この原理 通りに測定電流の拡散が抑制され、対極直下部の鉄筋の みを被測定物と限定できるのであれば、被測定面積は例 えば対極長と鉄筋上側の表面積とを乗じた値で近似され, 分極抵抗測定値×表面積でR_nを推定することができる。

しかし,近年の研究で,2 重対極式を適用した場合, いくつかの不具合が生じることが指摘されている。例え ば,不動態化した鉄筋のように分極抵抗が大である場合 には被測定面積を十分に限定できない。また,鉄筋径が 太くなった場合に,鉄筋上側の表面積のみを乗じると真 の分極抵抗よりも大きい値となることが指摘されている ³⁾。また,局部腐食が生じた箇所を測定した場合について 分極抵抗が過大となるとの指摘もされている⁴⁾。これら は,2 重対極式がガードリング電極によるコンクリート

*1 ㈱日鐵テクノリサーチ 検査・計測事業部 君津センター 技術主幹 博士(工学) (正会員) *2 新日本製鐵㈱ 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員 博士(工学) 表面のみでの電流分布制御方式であることの特徴に起因 すると考えられる。本報で議論する単対極式の分極測定 手法と同様に2重対極式に関してもコンクリート中の電 流分布に与える諸要因について十分検討し,真の分極抵 抗を精度良く推定する手法の確立が今後とも望まれる。 上記の局部腐食が生じた場合に関しての分極測定値の評 価法に関しては両方式において共に今後の課題である。

本報では,筆者らが提案する,BEMによるコンクリー ト中の電流分布解析とインピーダンス特性曲線を用いた 逆推定法による分極抵抗の算出手法⁵について,単対極 式を用いた場合の各種条件(配筋状況,対極の設置位置, コンクリート比抵抗,鉄筋の分極抵抗等)によって電流分 布や算出される分極抵抗がどのように変化するかシミュ レーションを行ったので報告する。

2. BEM によるコンクリート中の電流分布解析手法 2.1 BEM の利点

BEM は境界上のみを分割すれば近似解が得られ,FEM のように領域全てを分割するのと比較して要素数,節点 数が少なくなるため,計算時間の短縮が可能となる。 FEM の場合,コンクリート要素も分割しなければならな いが,BEM はその必要が無く,腐食問題のような物体表 面上の物理量を解析する問題については,計算時間の短 縮のみではなく,条件入力や出力結果の確認の点でも取 扱いが容易である。

2.2 解析手法

(1)対極と鉄筋の形状のモデル化

BEM は松岡らが開発した 3 次元境界要素法プログラ ム Gal96-Ver09 を用いた。図-1 は単鉄筋直上に対極を設 置した場合のモデルの一例である。鉄筋直上の場合,左 右/鉄筋軸方向ともに対象であるため,節点数削減のため にプローブ中心を基点とした 1/4 モデルにできる。図-1 では幅方向は有限に見えるが,解析では無限の幅を持つ モデルになっている。対極の寸法は,実際の構造物の診 断に応用できるように,分極抵抗測定器のプローブの対 極と同一サイズにしている(図-2)。異形鉄筋の表面形状 をモデル化することは困難なため,呼び径の円筒モデル としている。

2 重対極式でも測定可能なようにリングは2 重リング 構造になっているが、単対極式測定では内外のリングは 電気的に短絡させた回路としている。コンクリート表面 (対極を設置する平面)では、電流の流出入の無いゼロの 条件とする。

(2)コンクリート比抵抗

コンクリート比抵抗 $\rho(\Omega \cdot cm)$ はコンクリート内全体で 一定とする。BEM では $10^5 \Omega \cdot cm$ を初期値とした。



図-1 単鉄筋モデル例



図-2 プローブ寸法 (mm)

(3) 電位印加のモデル化

分極測定としては2周波数法による測定を考える。測 定ではコンクリート表面に置かれたプローブ内の対極と コンクリート中の鉄筋との間に周波数の異なる電圧が印 加され、その結果、回路に電流ΔIが流れ、プローブ中心 の照合電極でコンクリート表面の電位変動∆¢が測定さ れる。そして周波数に応じた 2 つの抵抗Δφ/ΔI が算出さ れる。その際、鉄筋は初期の自然電位から分極され電位 変動する。同様に対極も分極され電位変動する。この回 路で生じる電気化学的現象を解析では、異なる自然電位 を有する鉄筋(0.0V)と対極(1.0V)とを電気的に短絡させ た現象で模擬する。この時,電位差1.0V が短絡時の起電 力となり鉄筋と対極はコンクリートを介して同電位にな ろうとするため、鉄筋は対極の電位に引張られてより貴 な電位に、対極は鉄筋の電位に引張られてより卑な電位 に移動する。鉄筋からはこの釣合いに見合った電流が流 出し、対極に流入する。実際の計測では、矩形波交流電 流で測定しているため,電流は鉄筋と対極との間に交番 して流れているが、微小電位変動で線形分極の範囲で有 る場合にはどちらの方向に電流を流した場合でも結果は 同じである。BEM ではこの状態を再現して解析を行って いる。電位をそれぞれ 0.0V, 1.0V に設定するのは, BEM で計算されたプローブ中心での電位がそのまま電位変動 分と等しくなり、後の計算が簡単になるからである。

(4)分極曲線の設定

BEM では境界条件として鉄筋(アノード)と対極(カソ ード)にそれぞれに分極特性を与え,これら分極曲線の電 位の差を起電力として回路に電流を流している。測定周 波数や鉄筋の腐食状況によって分極抵抗が変化するため, これらを模擬する必要がある。鉄筋のアノード分極曲線 として式(3),対極のカソード分極曲線として式(4)を設定 する。下添字の0は電流がゼロの場合,rebarは鉄筋,CE は対極の Counter Electrode を示している。

$$\phi_{\text{rebar}} = \phi_{0,\text{rebar}} + R_{\text{p,rebar}} \cdot i \tag{3}$$

(4)

$$\phi_{CE} = \phi_{0,CE} + R_{p,CE} \cdot i$$

この傾きを変化させることで,分極抵抗の変化を模擬 できる。実際に分極抵抗を算出する際は対極の分極抵抗 は一定とし,鉄筋の分極抵抗を変化させて計算している。

溶液中の金属片等の電気化学測定では,試料極の面積 に対して対極の面積が同等かそれ以上の大きさのものが 用いられるが,コンクリート中の鉄筋を対象とする場合, プローブの対極に対して鉄筋(試料極)が極めて大なため, 対極の分極特性はコンクリート中の電流分布解析では無 視できない。解析に用いる R_{p.CE}の値は,実際に使用する プローブの対極を用いて実測した。図-3に対極の分極抵 抗の測定状況を示す。プローブを水道水に浸した状態で 内・外対極リングを試料極と対極として利用し,実構造 物の調査時と同様に高周波数:400 Hz,低周波数:0.1 Hz で水道水を介して測定を行った。プローブ中央の照合電 極は取り外した状態で測定しており,内対極リングと外 対極リングを用いて電位変動をΔφを計測している。一般 にコンクリート中の鉄筋の分極抵抗を測定する際は,水



$$\mathbf{R}_{p,CE} = \frac{\mathbf{R}_{p,CE}}{\mathbf{A}_1} + \frac{\mathbf{R}_{p,CE}}{\mathbf{A}_2} = \frac{\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2}{\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2} \cdot \mathbf{R}_{p,CE}$$
$$\mathbf{R}_{p,CE} = \frac{\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2}{\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2} \cdot \mathbf{R}_{p,CE}$$

A₁: 内対極リング面積(cm²) A₂: 外対極リング面積(cm²) R_{p,CE}': 分極抵抗測定値(Ω) R_{p,CE}: 真の対極の分極抵抗(Ω・cm²)

図-3 対極の分極抵抗測定状況

道水をコンクリート表面に散水後,浮き水を除去して水 分を含んだ媒質を介してコンクリート表面に対極を設置 するため,実際の測定時の対極の分極抵抗と図-3 で測定 した時の分極抵抗は,ほぼ同じと考えられる。通常の環 境下での使用であれば,SUS304 の分極抵抗は大きく変 化しないと考えられるが,塩害環境下で使用した際等に は,不動態皮膜の破壊によって分極抵抗の低下も考えら れることから定期的に測定しておくことが望ましい。

(5)2周波数法測定のモデル化

このモデル化では,対極と鉄筋の分極抵抗を,高周波 測定ではほぼゼロ値とし,低周波測定ではこれに応じた 分極抵抗を分極曲線として設定している。

以上の条件で解析を行うと,未知数であった鉄筋と対 極との間に流れる電流,各電極表面の電流密度及び電位 が計算できる。

2.3 見掛けの全抵抗 Rt'の算定

前述の条件で計算された鉄筋表面から流出する電流の 合計が分極抵抗測定時の電流変動分: Δi にあたる。図-2 のプローブ中央に設置されている照合電極の電位変動: $\Delta \phi$ は BEM の内点計算機能によって求めることができる。 回路抵抗は、オームの法則から $R = \Delta \phi / \Delta i$ で計算でき、こ れが単対極式で測定される見掛けの全抵抗 R_t 'に相当す る。

2.4 見掛けのコンクリート抵抗 Rs'の算定

コンクリート抵抗は、前述のように高周波数で測定す るため、測定値に鉄筋と対極の界面抵抗成分(分極抵抗) は含まれない。したがって、鉄筋と対極の分極抵抗をそ れぞれほぼゼロ(BEM では便宜上1.0 Ω・cm²としている) と設定することで、見掛けのコンクリート抵抗 R_s'を算 出することができる。

2.5 見掛けの分極抵抗 Rp'の算定

低周波数で測定された抵抗値は、コンクリート抵抗成 分と分極抵抗成分を含んだ全抵抗である。したがって見 掛けの分極抵抗 R_p'は R_t'- R_s'で算出される。

3. BEM シミュレーション例

3.1 鉄筋径の違いによる鉄筋表面の電流密度分布の変化

同一かぶりで鉄筋径が細い場合と太い場合のシミュレ ーション結果を図-4に示す。解析条件はかぶりを50 mm, 鉄筋径を10,32 mm, コンクリート比抵抗を $10^5 \Omega \cdot cm$, 鉄筋の分極抵抗を $10^5 \Omega \cdot cm^2$, 対極の分極抵抗を $1.74 \times 10^5 \Omega \cdot cm^2$ (図-3の測定で求めた値)としている。この電 流密度は,鉄筋と対極の電位をそれぞれ0.0 V, 1.0 Vに 設定した計算結果であり,実際の電流密度分布はこの値 にある定数を一様に乗じたものとなる。細径の場合は, 鉄筋の側面にも電流が流れこんでいるが,太径の場合は 鉄筋の上側の電流密度が高いことがわかる。



電流密度分布の変化

電流密度分布の変化

3.2 かぶりの違いによる鉄筋表面の電流密度分布の変化

かぶりが小さい場合,電流はプローブの対極直下の鉄 筋に集中して流れ、かぶりが大きくなると電流が拡散し ていく。図-5に鉄筋径が10mm,かぶりが20,40mm の場合のシミュレーション結果を示す。他の条件につい ては, 3.1 と同じである。かぶり 20 mm の場合は, 対極 直下の電流密度が高くなっていることが確認できる。

3.3 コンクリート比抵抗と鉄筋の分極抵抗の変化による 鉄筋表面の電流密度分布の変化

コンクリート比抵抗が低くなると(導電率が高くなる と)、コンクリート中に電流が流れやすくなるため、電流 が拡散して鉄筋に流れていく。反対にコンクリート比抵 抗が高くなると(導電率が低くなると),電流は拡散しに くくなり、対極直下の鉄筋に集中して流れやすくなる。 図-6 は鉄筋径が 10 mm, かぶりが 20mm, コンクリート 比抵抗を 10^5 から $10^4 \Omega \cdot cm$ に変更してシミュレーショ ンを行った結果である。図-5の上図と比較すると拡散し て電流が流れていることがわかり, コンクリート比抵抗 の低下による電流の拡散傾向は確認できる。角柱供試体 に鉄筋を1本配置した室内実験モデルでは、同様な電流 密度分布になる。鉄筋の分極抵抗が低くなると、鉄筋に 電流が流出入しやすくなるため、対極直下の鉄筋の電流 密度が高くなる。反対に鉄筋の分極抵抗が高くなると、 鉄筋に電流が流出入しにくくなるため、電流はコンクリ ート中を拡散しながら流れることになる。図-7は鉄筋径 が10 mm, かぶりが40mm, 鉄筋の分極抵抗を10⁵から

10⁴ Ω・cm²に変更してシミュレーションを行った結果で ある。図-5の下図と比較すると対極直下の電流が流れて いることがわかる。

電流が対極直下に集中して流れるか、もしくは拡散し て流れるかは、コンクリート比抵抗と鉄筋の分極抵抗に よって決まる。コンクリート比抵抗に対して鉄筋の分極 抵抗が高ければ、鉄筋よりもコンクリート中の方が電流 が流れやすいため拡散し、鉄筋の分極抵抗に対してコン クリート比抵抗が高ければコンクリートよりも鉄筋に電 流が流れやすくなる。R_pとpの比は Wagner の分極パラメ ーターとして知られており, Lp>1の場合は電流が拡散す る傾向が大となり、1>L_pの場合は電流が集中する傾向と なる。

$L_p(cm) = R_p(\Omega \cdot cm^2) / \rho(\Omega \cdot cm)$

(5)

図-8 は鉄筋径が 32mm, かぶりが 60mm のモデルで R_n とρを変化させた際のプローブ中央から鉄筋上面に90% の電流が流れる長さを示したものである。鉄筋径 32mm, かぶり 60mm の条件では、分極パラメーターが 0.1 以下 の場合, プローブ中央から 13cm の範囲の鉄筋に 90%の 電流が流れ、1を超えると拡散していくことがわかる。

3.4 電流分布状況のまとめ

BEM のシミュレーション結果から,電流分布状況は配 筋、コンクリート比抵抗、鉄筋の分極抵抗によって変化 することが確認できた。分布状況はどの範囲の鉄筋が調 査範囲になっているかを確認するのに有効な情報となる。 電流の拡散傾向をまとめると以下のようになる。



(1)鉄筋径が細径の場合は、電流は鉄筋側面までまわりこむように流れるが、太径の場合は鉄筋上側に流れる。
(2)かぶりが小さい場合は対極直下に集中して電流が流れ、かぶりが大きくなると拡散して流れる。

(3)コンクリート比抵抗が小さくなると電流は拡散し, 鉄筋の分極抵抗が小さくなると集中して流れる。拡散 傾向については,分極パラメーターを目安とすると良い。

4. 逆推定法による鉄筋の分極抵抗の推定

4.1 逆推定法の概念

BEM シミュレーションにより, 電流分布状況の把握が 可能なことを示した。しかし, 必要な情報は電流分布状 況では無く, 腐食速度の推定に必要な鉄筋の真の分極抵 抗: R_p である。松岡らは BEM シミュレーションで得ら れるインピーダンス特性曲線を用いて, 分極抵抗測定器 が表示する見掛けの分極抵抗: R_p 'から R_p を逆推定する 手法を提案している^{3), 5)}。 ρ と R_p を仮定し, BEM で R_s ' と R_p 'を算出しておく(順解析)。次に, 実際の測定で分極 抵抗測定器が表示する R_s 'と R_p 'と BEM の結果が合致す るような R_p を求める(逆推定)。

4.2 インピーダンス特性曲線の計算

 ρ と対極の分極抵抗: $R_{p,CE}$ を一定の値とし,鉄筋の R_p のみを変化させる。BEM で対極中心の電位変動量と対極 への総流入電流量から R_t 'が計算できる。この R_t 'には ρ の影響が含まれているため,式(7)で示す R_s で除し無次 元化して R_t '/ R_s とする。一方,この R_t '/ R_s に対応させて, 分極抵抗が R_p で面積が 1cm×1cm の鉄筋上にかぶり b(cm)を有する直方体の試験体を考え,この R_t を式(6)で 計算し,上記と同様に(7)式の R_s で無次元化して R_t / R_s と する。これらの値の対応関係を図化したものがインピー ダンス特性曲線である。図-9 は鉄筋径が 16 mm,かぶり が 20,50,100 mm の場合インピーダンス特性曲線の例 である。x 軸に R_t / R_s をとり,y 軸に R_t '/ R_s の値をとって いる。また表-1 に BEM の結果を示す。 $R_p \ge 10^0 \sim 10^7$ ま で変化させた際の R_t / R_s の値を算出している。 R_t



表-1 BEM 結果 (鉄筋径 : 16mm, かぶり 30mm)

R _{p,CE}	R _p	ΔI	Δφ	R _t '	R _t /R _s	R _t '/R _s
$\mathbf{\Omega} \cdot \mathrm{cm}^2$	$\Omega \cdot cm^2$	А	V	Ω	-	-
1	1	4.188E-05	0.9427	5627	1.0	0.0188
174000	10	1.881E-05	0.5075	6745	1.0	0.0225
174000	100	1.881E-05	0.5076	6746	1.0003	0.0225
174000	1000	1.880E-05	0.5080	6757	1.0033	0.0225
174000	10 ⁴	1.867E-05	0.5122	6859	1.0333	0.0229
174000	10 ⁵	1.782E-05	0.5384	7554	1.3333	0.0252
174000	10 ⁶	1.503E-05	0.6152	10232	4.3333	0.0341
174000	10 ⁷	7.181E-06	0.8167	28433	34.333	0.0948

と R_sは以下の式で計算できる。

$$\mathbf{R}_{t} = \mathbf{R}_{s} + \mathbf{R}_{p} \qquad (\mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{cm}^{2}) \tag{6}$$

$$\mathbf{R}_{s}=\mathbf{b}\times\boldsymbol{\rho}\qquad(\boldsymbol{\Omega}\cdot\mathbf{cm}^{2})\tag{7}$$

 R_t は直方体の供試体を用いて低周波で測定される全抵 抗であり R_s と R_p の和である。 R_s は 1cm×1 cm の面積を 有する鉄筋上に載っているかぶり b(cm)の直方体のコン クリートの抵抗である。かぶりが大きくなると、コンク リート抵抗成分: R_s の値が大きくなるため曲線が下側に シフトしている。

高周波数で測定した場合,測定値は分極抵抗成分を含 まないコンクリート抵抗成分となる。BEM では便宜上、 対極と鉄筋の分極抵抗を非常に小さい値(1Ω・cm²)に設 定して計算している。低周波数で測定するとコンクリー ト抵抗成分と分極抵抗成分の合計が測定される。

4.3 逆推定法による鉄筋の分極抵抗の算出

実構造物中の鉄筋は、図-9のインピーダンス特性曲線 上のある点をとることになる。x 座標の値が 1.0 となる場 合(全抵抗=コンクリート抵抗)の y 座標の A 点を求める。 すると R_s は R_s '/A で計算され、同時にコンクリート比抵 抗も ρ = R_s /b で求まる。 R_t 'は分極抵抗測定器が表示する R_s 'と R_p 'の和である。 R_s が求まったので y 軸の B 点の値 が求まる。B 点に対応する x 軸の C 点の値を曲線から読 み取る。 R_p / R_s =C-1.0 であるので R_p は R_s ×(C-1.0)で算出 される。上記の手順で未知数であった鉄筋の真の分極抵 抗 R_p を求めることができる。



4.4 BEM におけるρ値の影響

BEM を行う際, コンクリート比抵抗: ρ が未知数であ るため, 適当な値を用いて解析を行う必要がある(シミュ レーション例では $10^5 \Omega \cdot cm$ と設定)。図-10にコンクリ ート比抵抗が 10^4 , 5×10^4 , 10^5 , 5×10^5 , $10^6 \Omega \cdot cm$ と変 化した場合のインピーダンス特性曲線を示す。比抵抗の 増加によって曲線が右にシフトするものの, ほぼ同一曲 線上にのることが確認できる。したがって BEM を行う 際のpは適当な値を入力しても算出される鉄筋の分極抵 抗値にはあまり影響を及ぼさないといえる。精度を向上 させたい場合は、逆推定時に二次的に R_s/b でpが求まる ため, この値を用いて再度 BEM を行うと改善されると 考える。

4.5 実構造物の鉄筋の Rp を推定する手順

単対極式を用いた場合,以下の手順で鉄筋の真の分極 抵抗: **R**_pを推定することができる。

(1)プローブの対極の分極抵抗: R_{p,CE}を測定する。

(2)図面,鉄筋探査,はつり作業等により配筋状況(かぶ り,鉄筋径)を確認する。

(3)配筋状況をモデル化し BEM でインピーダンス特性 曲線を作成する。

(4)分極抵抗測定器の測定値(R_s'と R_p')を用いて逆推定 法により鉄筋の真の分極抵抗:R_pを算出する。

5. まとめ

BEM による電流分布シミュレーションを行うことで、 鉄筋径、かぶり、コンクリート比抵抗、鉄筋の分極抵抗 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。鉄筋径が細径の場合は鉄筋側面まで電流が流れ、 太径の場合は、鉄筋上面に集中して流れる。かぶりが小 さいと対極下に集中して電流が流れ、大きくなると拡散 する。コンクリート比抵抗が低下すると電流が拡散し、 鉄筋の分極抵抗が低下すると集中して流れる。

また,インピーダンス特性曲線を用いた逆推定法によ る鉄筋の分極抵抗推定方法を紹介した。今後は以下の項 目について検討を行っていきたい。

(1)実構造物の調査を行う際,かぶりや鉄筋径の測定誤



図-11 鉄筋直上に対極を設置しなかった例

差, プローブの対極設置位置と鉄筋位置のずれ等のエラ ーが生じる場合がある。この場合 BEM モデルと実際の 対極と鉄筋の幾何学的位置関係が異なり,算出される R_p に誤差が生じる。これらのエラーが生じた場合に R_pが真 値とどの程度の誤差が生じるかを検証する。例として図 -11 に対極を鉄筋直上に設置しなかった場合の電流分布 を示す。図-5 上図と比較すると対極側に偏って電流が流 れていることがわかる。

(2)実構造物の配筋状況は単鉄筋ではなく格子状になっているため,格子状の配筋状況をモデル化してシミュレーションを行う。

(3)今回のシミュレーションでは,鉄筋の分極抵抗は全 域にわたって一定としている。しかし,実構造物では局 部腐食等により,鉄筋の一部分の分極抵抗が低くなって いることがある。BEM モデルで鉄筋の一部分の分極抵抗 を低い値に設定することで局部腐食を再現でき,腐食し ていない分極抵抗の高い部分よりも分極抵抗の低い箇所 に電流が流れると推定される。

参考文献

- 例えば小林孝一,宮川豊章:分極抵抗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
- K. Matsuoka, H. Kihira, S. Ito and T. Maruda : Corrosion monitoring for reinforcing bars in concrete, Corrosion rates of steel in concrete, ASTM, Special Technical Publication 1065, pp.103-117, 1990.8
- 松岡和巳:分極抵抗法を用いた RC 構造物中鉄筋の 定量的腐食評価に関する研究,大阪大学博士論文, 2005.2
- H. Wojtas : Determination of polarization resistance of reinforcement with a sensorized guard ring : analysis of errors, Corrosion, pp.414-420, 2004.4
- 5) 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, 2003.7