

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

新日本製鐵（株） 正会員 松岡 和巳
大阪大学大学院 フェロー 松井 繁之

1. まえがき

近年の鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化対策にあたっては、腐食状態の正確な把握が重要で、それを可能とする腐食モニタリング技術の開発が求められる。この分野では、これまで電位測定による腐食判定法に関して多くの研究が行なわれてきたが、最近では精度の向上を目的に分極抵抗測定による腐食評価手法の研究¹⁾が進められている。この手法は、腐食速度の評価が可能で実用化が期待される反面、構造物を対象とした場合、正確な分極抵抗の評価は難しい。その障害の一つは、コンクリート中での測定電流の分散特性にある。そこで、筆者らはコンクリート梁中の単鉄筋を対象として交流インピーダンス測定を行なう場合について2次元 FEM 解析によりコンクリート中の電流分布特性を調査した²⁾。本報告では、これを更に進め3次元 BEM 解析によりコンクリート中電流分布特性を調査したので以下にその内容を報告する。

2. 解析の概要

(1) 解析手法：ここで用いた3次元 BEM 解析プログラムは、海洋鋼構造物の電気防食シミュレーション手法として筆者らが開発³⁾したもので、溶液中における金属の非線形な分極特性を境界条件として Laplace 方程式を数値解析する手法に基づいている。今回の解析で使用した要素を図1に示す。図1(a)は、8節点の Isoparametric 要素で、要素の形状及び要素内の電位電流は2次関数で表現されており任意形状や曲面表現が容易である。一方、図1(b)は、新たに開発した2節点 Bar 要素で、電位電流は周方向で一定（平均値）で軸方向にのみ変化する1次関数で表現されている。この Bar 要素は、ソース点から十分遠方にある、もしくはソース点からの距離に比して要素の径が十分に小さいことを仮定し定式化している。この要素の特徴は、複雑な鉄筋配置に対してモデル化が容易で節点数も低減できることにある。しかしながら、定式化時の仮定からその特性を見極めて使用する必要がある。

(2) 解析モデル：解析モデルは、大きなコンクリート構造物中の鉄筋を対象に交流インピーダンス測定する場合を想定し図2に示すモデルを用いた。即ち、比抵抗 $\rho = 1\text{k}\Omega\text{cm}$ を有する半無限コンクリートの表面下、カブリ B の位置に、長さ $2L=2,000\text{mm}$ 、径 $D=10\text{mm}$ の鉄筋が埋設されている。そして、鉄筋の中央部上に筆者らの開発した二重対極²⁾が配置されている。実際の解析ではこの半無限領域を $1/4$ 対称モデルとして扱い、対極表面は、Isoparametric 要素を用いて半径方向6分割、周方向4分割とした。鉄筋表面は Isoparametric 要素を用いた場合、周方向4

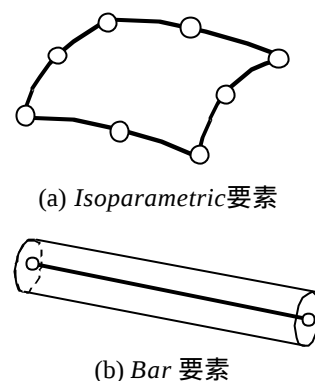


図1 3D境界要素

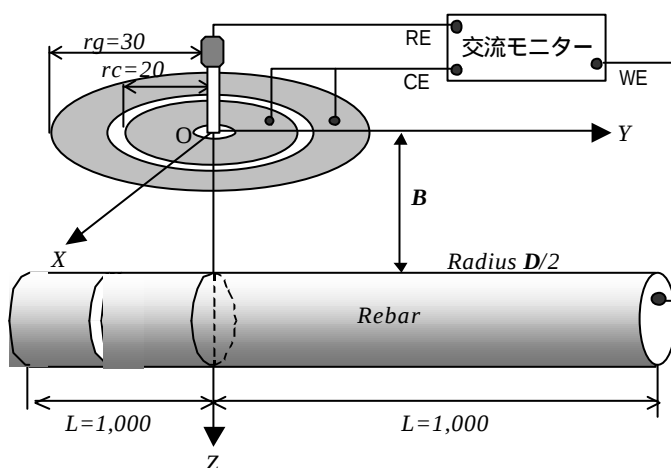


図2 解析モデル

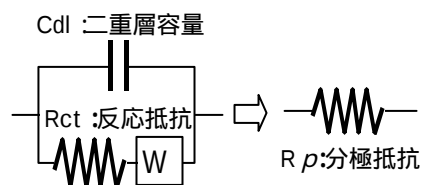


図3 界面モデル

Keyword: 鉄筋腐食, モニタリング, AC インピーダンス, BEM, 分極抵抗

連絡先: 〒293-8511 富津市新富 20-1, Tel0439-80-3090, Fax.0439-80-2745

分割、長さ方向 100 分割とした。Bar 要素を用いる場合、長さ方向を 100 分割とした。そして、鉄筋界面は、図 3 に示す通り二重層容量 Cdl 、ファラデーインピーダンス部（反応抵抗 R_{ct} + Warburg インピーダンス W ）を含めた全インピーダンスの絶対値を線形な分極抵抗 R_p で表現し、全要素で同一値とした。電圧変動は、図 2 の座標軸原点の位置で $\Delta E = +10\text{mV}$ となるように 2 重対極と鉄筋との間に加電圧を加えた。計算 Case として、カブリは $B=10, 50, 90\text{mm}$ の 3 Case、鉄筋の分極抵抗は、過去の実測値を参考に最大値を $10^6 \Omega\text{cm}^2$ として高周波数側から順次周波数を sweep down させる状況を $R_p=10^0, 10^1 \sim 10^6$ の 7 Case で模擬した。今回の解析では、二重対極を単一对極として整理を行なった。

3. 解析結果および考察

図 4～図 5 は、鉄筋表面に *Isoparametric* 要素を用いた場合の結果である。図 4 は、 $R_p=10^0 \Omega\text{cm}^2$ の場合（高周波領域での測定条件）には、カブリの増加とともに対極直下の電流密度は減少し、分極領域が拡大する傾向を示している。図 5 は、カブリ 50mm の条件で R_p が順次増加した場合（低周波領域へ周波数を sweep down する条件）に電流分布が均一化していく傾向を示している。図 6 は、鉄筋を 2 種類の要素で解析した結果の比較である。分極電流の総和は、両要素で良く一致していた。*Isoparametric* 要素の解析からは、鉄筋上面に下面の 3 倍程度の電流集中があることがわかる。Iso/mean は、*Isoparametric* 要素を用いた計算値を鉄筋周方向で積分平均した電流密度である。この比較からは、対極中心から 10cm 程度離れると両要素の電流密度は、良好に一致することがわかる。

4. まとめ

境界要素法を用いたコンクリート中の 3 次元電流分布解析から以下のことが明らかとなった。

- 1) 交流インピーダンス測定における主たる分極領域とそこでの電流密度は、カブリ、分極抵抗に依存しており、各値が大きくなるとともに分極領域は広がり、電流密度は小さくなり均一化の傾向を示す。
- 2) Bar 要素の解析値は、対極から一定距離離れば *Isoparametric* 要素の解析値と良好に一致する。

参考文献：

- 1) 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, pp173-186, 2001.
- 2) Kazumi M., Hiroshi K. et al.: “Corrosion Monitoring for Reinforcing Bars in Concrete”, ASTM STP 1065, pp.103-117, 1990.
- 3) Noriyuki H., Kazumi M. et al.: “Development of Incremental Voltage Method and Its Application to Numerical Analysis of Potential Distribution of Coastal Structures”, ISIJ, EVALMAT89, pp383-390, 1989.

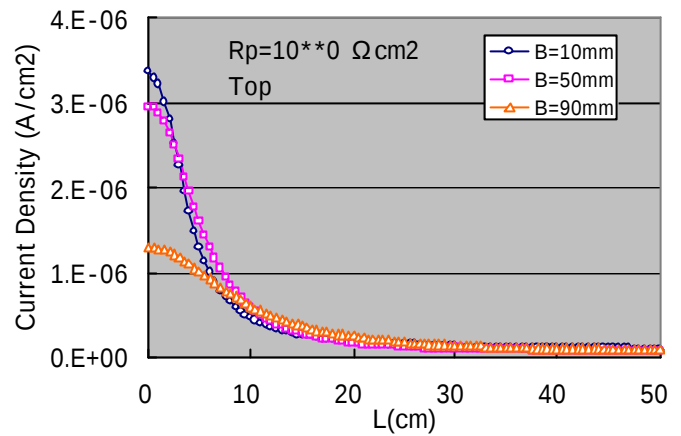


図 4 カブリ B 変化にともなう電流分布特性

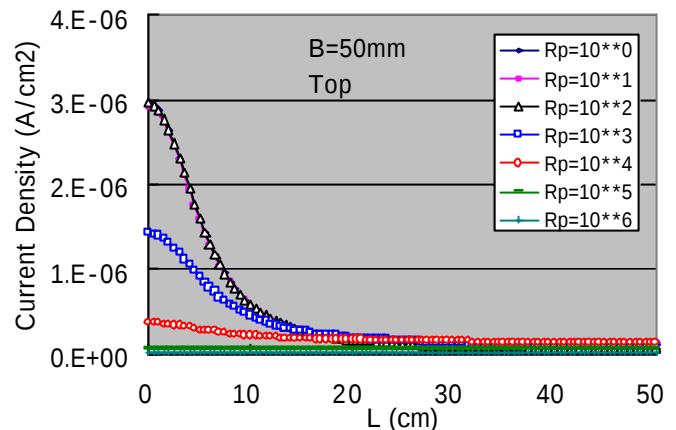


図 5 分極抵抗 R_p 変化にともなう電流分布特性

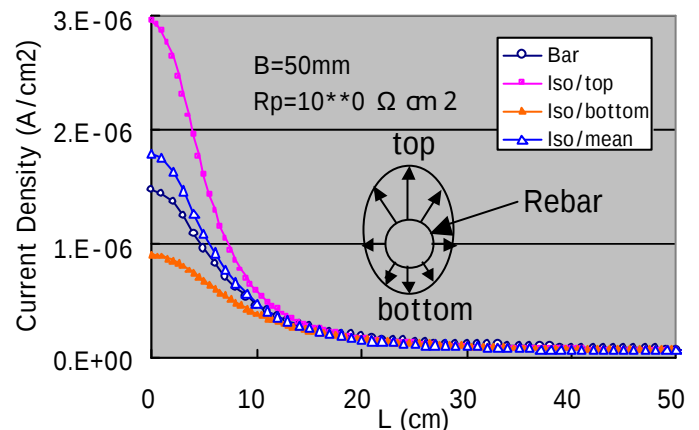


図 6 Bar 要素と *Isoparametric* 要素との比較