

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

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

最近、鉄筋の腐食モニタリング手法として、分極抵抗値による腐食評価手法の研究が進められている。この手法に関しては、これまでも多くの研究があり、ラボ実験によりその妥当性が検証されつつある。しかしながらこの手法を構造物に適用する際には、測定対象となる鉄筋の面積が対極の面積に比べて大きく、鉄筋の表面を限定して分極できないという問題があり、これが適用上の大きな障害となっている。そこで、筆者らはコンクリート中の鉄筋を対象とした交流インピーダンス測定状況を 3 次元 BEM 解析¹⁾によりシミュレートすることで得られたインピーダンス特性曲線を用いて見掛けのインピーダンスから単位面積あたりで定義される真のインピーダンスを逆推定する手法²⁾を開発した。本報告では、この手法を港湾構造物中に 18 年間埋設暴露された鉄筋に適用し、その妥当性について検討したので以下にその内容を報告する。

2. 実験と解析の概要

(1) 暴露鉄筋仕様及びコンクリート性状：測定対象とした鉄筋は、山口県光市に位置する係留ドルフィン上面（図 1）のコンクリート中に昭和 59 年から 18 年間埋設暴露されていた長さ 100cm の電炉鉄筋 D16(No.169,170,171)と SUS304 鉄筋 D13(No.181,182,183)である。打設コンクリートは、 $W/C=50\%$ 、スランプ 8cm で設計されたもので、調査時のフェノールフタレン試験による中性化深さは 1mm 以下、また、JCI による塩分含有量試験によれば、鉄筋埋設位置の 70～80mm における全塩分量は 0.01～0.035%であった。回収後の SUS 鉄筋には発錆は見られなかったが、電炉鉄筋には面積比で 2～5%程度の発錆が観察された。

(2) インピーダンス測定：測定に先立ち、図 2 に示すように測定対象とする埋設鉄筋の一部を 10cm 程度ハツリ出した後、水道水によりコンクリート表面を十分に湿らせた。測定は、図 3 に示す要領で筆者らが開発した二重対極式センサーに二重パルス重畳方式の腐食モニターを用い 3 電極方式の測定（以下、センサー測定という）を行なった。測定周波数は、高周波 $f_H = 400\text{Hz}$ 、低周波 $f_L = 0.1\text{Hz}$ とし、各々で見掛けのインピーダンス $R_{tap}(f_H)$ 、 $R_{tap}(f_L)$ を測定した。また、正確な分極抵抗値 R_p を測定するためにステンレス製の大型対極（ $W55 \times L820 \times t1\text{mm}$ ）を鉄筋上に配置し近傍に参照極を置いた測定（以下、大型対極測定という）も行なった。測定周波数は上記と同じとした。

(3) インピーダンス特性曲線計算：3 次元 BEM 解析による



図 1 鉄筋暴露場所（ドルフィン上）

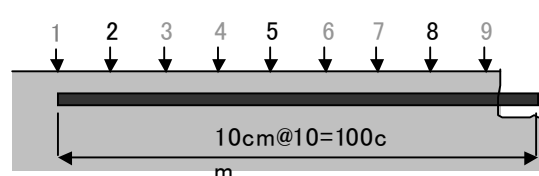


図 2 鉄筋寸法と測定位置

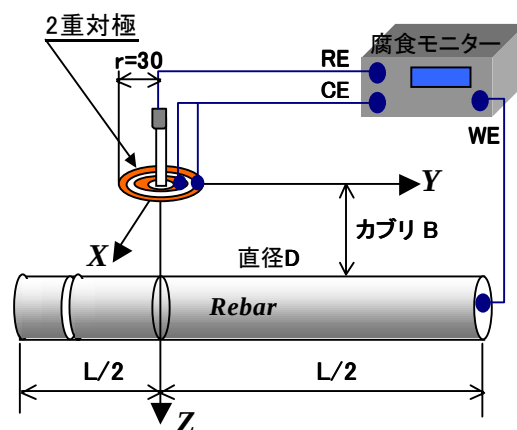


図 3 センサー測定状況の模式図

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

インピーダンス測定状況のシミュレーションでは、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 $B=70, 80 \text{ mm}$ の位置に、長さ $L=90 \text{ cm}$ 、径 $D=13, 16 \text{ mm}$ の鉄筋が埋設されているモデル（図3）を用いた。二重対極は鉄筋の中央部直上に配置している。実際の解析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。鉄筋表面は周方向 4 分割、長さ方向 45 分割とした。そして、鉄筋界面は、図4に示すような等価回路のインピーダンス絶対値を線形な分極抵抗 R_p でモデル化し全要素で同一とした。上記モデルを使用して鉄筋径、カブリの各々の組合せについて分極抵抗を $R_p=10^0, 10^1 \sim 10^6$ の 7 Case 計算をおこない、図5に示すインピーダンス特性曲線を得た。ここで、X 軸には真のインピーダンス $R_t=Rs(1+R_p/R_s)$ を、Y 軸には見掛けのインピーダンス R_{tap} を各々 $Rs=B\rho$ で規準化しプロットした。

(3) 真の分極抵抗値とその推定値：センサー測定で得られた見掛けのインピーダンス $R_{tap}(f_H), R_{tap}(f_L)$ を用いて、図5に示すインピーダンス特性曲線を用いた逆推定法²⁾を適用し真の分極抵抗の推定値 R_p' を求めた。この概略は図6に示す通りで、Step-I：A点を読み取り Rs を求める。Step-II：B点を計算し曲線との交点からC点を読み取り R_p を算出する手順となる。また、真の分極抵抗 R_p は、大型対極測定から得られた分極抵抗に鉄筋の表面積を乗じて求めた。

3. 解析結果および考察

上記で求めた真の分極抵抗 R_p とその推定値 R_p' を図7に示す。センサー測定値は、各々測定点 2, 5, 8 で測定された値を示している。No.169の電炉鉄筋及びNo.182のSUS304鉄筋でセンサー測定値に多少大きい値が見られるが、他ではほぼ大型対極測定値は、センサー測定値の平均値に近い値を示している。これらの差異は、センサー測定は局所的な鉄筋の分極特性を、大型対極測定は、鉄筋全体の平均的な分極特性を測定していることによるものと考えられる。

4. まとめ

実構造物に長期暴露された鉄筋を対象として、インピーダンス特性曲線を用いた分極抵抗の逆推定法の適用性評価をおこなった結果、逆推定値は大型対極測定値と近い値を示し、その妥当性が認められた。

参考文献：

- 1) 松岡，松井：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, 2002.9
- 2) 松岡，松井：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.25，2003.7(投稿中)

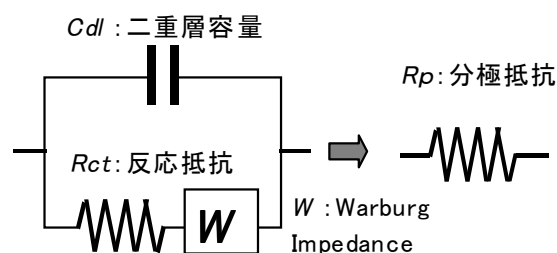


図4 等価回路のモデル化

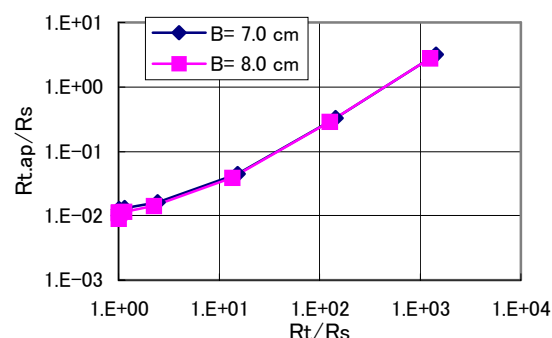


図5 インピーダンス特性曲線（D16）

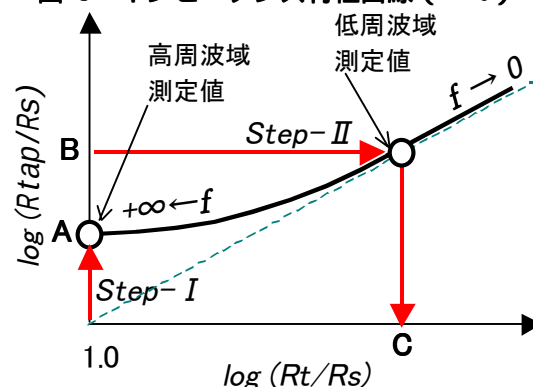


図6 インピーダンス特性曲線による逆推定法

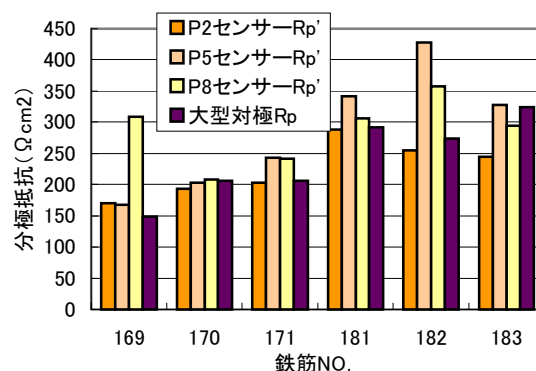


図7 鉄筋別の測定値比較