

論文 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

松岡 和巳^{*1}・松井 繁之^{*2}

要旨：コンクリート構造物中の鉄筋の腐食評価法として交流インピーダンス法を適用した際に得られる見掛けのインピーダンス測定値から真のインピーダンスを推定する手法として、3次元BEM解析によるインピーダンス特性曲線を用いた逆推定法を開発した。そしてこの手法の有効性を水槽実験により検討した。さらにインピーダンス特性曲線に与える鉄筋カブリ、鉄筋径、鉄筋長さの影響について数値解析的に評価した。また、鉄筋のインピーダンス解析における Bar 要素の精度を *Isoparametric* 要素との対比で評価した。

キーワード：鉄筋腐食，モニタリング，交流インピーダンス，分極抵抗，数値解析

1. はじめに

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、このための非破壊的な腐食モニタリング技術の開発が求められている。この分野では、従来から電位法を適用した腐食状態の推定手法に関して多くの研究がおこなわれてきたが、最近では精度の向上を目的に分極抵抗測定法による腐食評価法の研究^{1,2,3}が進められている。この手法は、原理的に腐食速度の評価が可能となる反面、構造物に適用した場合には正確な腐食反応抵抗を評価することが難しいという問題がある。その障害の一つは、測定対象となる鉄筋面積が対極面積に比べて大きく、鉄筋の表面を限定して分極することができないことにある。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を2次元FEM解析によりシミュレートすることにより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⁴)を開発した。本研究では、この考え方を発展させ分極特性をより厳密に考慮した3次元BEM解析を用いた逆推定法を新たに開発しその有効性を実験的に検討した。またこのインピーダンス特性曲線に与える各種パラメータの影響についても評価した

ので以下に報告する。

2. インピーダンス特性曲線を用いた逆推定法

2.1 BEM 解析理論

交流インピーダンス測定法を用いたコンクリート構造物中鉄筋の腐食測定は、1次近似としては均質な溶液中に置かれた試料極となる鉄筋とこれに電圧を印加するために溶液表面に置かれた対極、電位を参照する参照極とを有する領域のポテンシャル問題と見なせる。したがって、この支配方程式は式(1)に示すラプラス方程式で表される。

$$\kappa \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

ここで κ は溶液、即ちコンクリートの電導度である。また、境界条件は一般的に次式となる。

$$\phi = \phi_0 \quad (\text{ } \Gamma_p \text{ 上で}) \quad (2)$$

$$q \cdot n = q_0 \quad (\text{ } \Gamma_c \text{ 上で}) \quad (3)$$

$$-q \cdot n = f_m(q) \quad (\text{ } \Gamma_m \text{ 上で}) \quad (4)$$

ここで ϕ_0, q_0 は境界 (Γ_p, Γ_c) において各々指定された電位、電流密度の値である。 n は境界における外向き法線ベクトルである。 $f_m(q)$ は鉄筋表面 (Γ_m) の分極曲線で、一般的には q の非線形な関数となり実験的に求められる。

式(1)を境界条件式(2),(3),(4)の下で解くことで境界における電位、電流密度を求めるこ

*1 新日本製鉄(株) 鋼構造研究開発センター主幹研究員 工修 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

となるが、その際 BEM 解析では境界を種々の要素により離散化し数値解法をおこなう手法をとる。この研究で使用した境界要素を図-1に示す。図-1(a)は、8 節点の *Isoparametric* 要素(以下, *Iso.*要素と略す。)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となる特徴を有する。一方、図-1(b)は、新たに開発した 2 節点 *Bar* 要素⁶⁾で、電位電流は周方向で一定(平均値)と見なし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されている。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特徴を有する。しかしながら、定式化時の仮定からその特性を十分見極めて使用する必要がある。

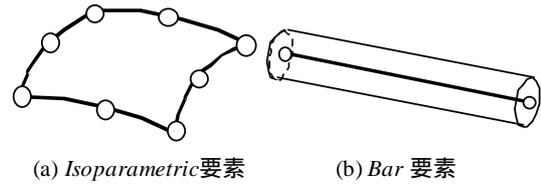


図-1 3次元境界要素

筆者らは、上記の理論に基づき 3次元境界要素法プログラム Gal96-Ver.10⁵⁾を開発し、これを使用した。

2.2 解析モデルの設定

実構造物を考えた場合、その部材形状と鉄筋配置はかなり複雑である。しかし、ここでは問題を単純化し図-2に示すような解析モデルを考えた。即ち、比抵抗を有する均質な半無限コンクリートの表面下、カブリ *B* の位置に、長さ *L*、径 *D* の鉄筋が配置されているモデルである。ここで鉄筋表面のインピーダンス特性は下記で説明する分極抵抗モデルとし全表面で一定であると仮定する。そして鉄筋の中央部直上に筆者らの開発した 2重対極式センサー⁴⁾を配置して腐食モニターで測定する条件を考慮する。

鉄筋表面のインピーダンス特性のモデル化にあたっては幾つかの等価回路モデルが提案されており、その一例を図-3に示している。ここで C_{dl} は二重層容量、 R_{ct} は電荷移動に伴う反応抵抗、 W は拡散にともなう Warburg インピーダンスである。このモデルをそのまま解析で考慮す

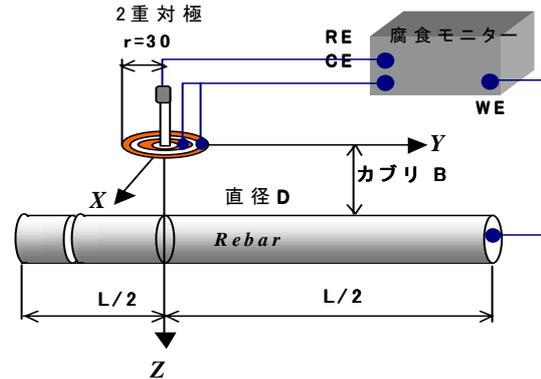


図-2 解析モデル

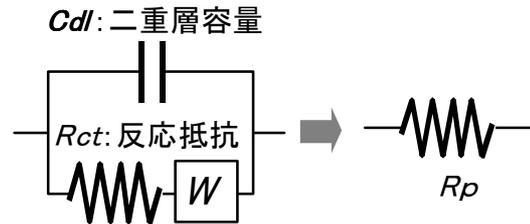


図-3 等価回路のモデル化

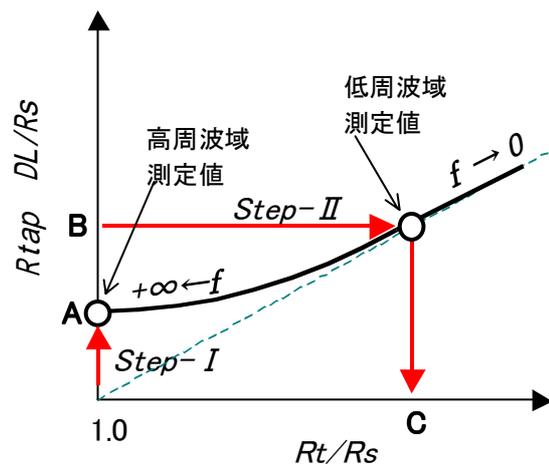


図-4 インピーダンス特性曲線の模式図

るにはかなり煩雑な取り扱いが必要となる。したがってここでは一つの分極抵抗 R_p で表現し、周波数依存性はこの値を種々に変化させること

で対応させることを考えた。したがって上記の BEM 解析では R_p の傾きを有する分極曲線を鉄筋表面の境界条件 (∞ 上で) として使用した。以下では、インピーダンスの絶対値を単にインピーダンスと呼ぶことにする。

2.3 インピーダンス特性曲線の計算法

図-4 にインピーダンス特性曲線の模式図を示す。この図のような特性曲線を計算するためには、まず測定対象となる構造物を 2.2 で説明した要領でモデルを作成し 2 重対極と鉄筋との間に電圧を印加した境界条件で BEM 解析をおこなう。そしてこの結果から得られる対極中心での電位変動量と対極への流入電流とから見掛けのインピーダンスを計算する。この計算を種々の変化させた R_p についておこない、計算されたインピーダンスを以下の無次元化処理で整理することでインピーダンス特性曲線が得られる。後で説明するがここでの α の設定は適当な値とすることができる。

この図の X 軸には R_t/R_s の値をとっており、 R_t, R_s は、各々次式で計算する。

$$R_t = R_s + R_p \quad (\text{単位: } \text{cm}^2) \quad (5)$$

$$R_s = Bx \quad (\text{単位: } \text{cm}^2) \quad (6)$$

ここで、 x はコンクリートの比抵抗 ($=1/\rho$) である。 R_s は、測定面積を限定した鋼板がコンクリートに埋め込まれたサンプルを用いて測定される高周波域での真のインピーダンスで、いわゆる液抵抗である。 R_t は低周波側で測定される真のインピーダンスで、液抵抗 R_s と分極抵抗 R_p の和である。一方、 Y 軸には $R_{tap} \cdot DL/R_s$ の値をとっており、 R_{tap} はコンクリート抵抗を有する構造物中のカブリ B の位置で、分極抵抗 R_p を有する鉄筋で測定された見掛けのインピーダンスである。 D は鉄筋径、 L は鉄筋長である。

この R_p の変化範囲は、鉄筋のインピーダンスを無視し得るような小さい値から不導態化した鉄筋に対応した高い値までを考慮し、 $R_p=10^0, 10^1 \sim 10^6 \text{ cm}^2$ の 7 ケースを解析した。いずれの解析でも 2 重対極は単一对極と見なし

データを整理した。

2.4 逆推定法

実構造物を対象とした通常のインピーダンス測定では、鉄筋直上の測定点一箇所当たり少なくとも 2 つのインピーダンス測定値を得る。それは液抵抗が計測される高周波数域で 1 点と鉄筋の分極特性が現れる低周波数域で 1 点である。これらはいずれも見掛けの値であり各々を R_{tap_1}, R_{tap_2} とする。これら値と 2.3 で計算したインピーダンス特性曲線を用いると真のインピーダンス R_s, R_p を逆計算で推定することが可能となる。その手順は以下の通りである。

Step-1 : 特性曲線が X 軸の $R_t/R_s=1.0$ と交わる点の Y 座標の値 A を求める。そうすると $R_s = R_{tap_1} \cdot DL/A$ で計算され、同時にコンクリートの比抵抗も、 $\rho = R_s/B$ で求まる。

Step-2 : 特性曲線上で Y 座標が $B = R_{tap_2} \cdot DL/R_s$ である点の X 座標値 C を決定する。そうすると次式 $R_p = (C-1) \times R_s$ で R_p が計算される。

3. 妥当性の検証

3.1 実験概要

2.4 で示した逆推定法の妥当性を検証するために以下のような室内実験をおこなった。すなわち図-5 に示す水槽 (高さ 50cm, 長さ 100cm, 奥行き 60cm) 内に 30cm 高さまで水道水 ($\rho = 4,347 \text{ cm}^3$) を満たし、この中にステンレス製の模擬鉄筋 (SUS304, $D=9.7\text{mm}$, $L=910\text{mm}$) を設置した。深さは $B=10, 30, 50\text{mm}$ の 3 つの水準とした。そして模擬鉄筋の中央直上の水面に 2 重対極式センサーを固定し 2 周波数方式の腐食モニター (日鉄テクノリサーチ製) を用いて腐食計測をおこなった。測定項目は、見掛けのインピーダンス R_{tap} で、その測定周波数は、高周波側を 400Hz で一定とし、低周波側を $2.5 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-3}\text{Hz}$ の範囲で変化させた。また、上記の模擬鉄筋の真のインピーダンスを測定するために対極としてステンレス製の円形パイプ (SUS304, $D=13.0\text{mm}$, $L=910\text{mm}$) を別途準備し、模擬鉄筋と

平行に設置して、上記と同じ測定条件でインピーダンス R_p を測定した。

3.2 数値解析と実験との比較

解析では水槽は十分に広く壁面及び底面の影響は無視できると考え、2.2 で説明した半無限モデルを採用した。この要素分割では半無限領域を 1/4 対称として扱い、対極表面は Iso 要素を用いて半径方向 6 分割（内対極 4 分割，外対極 2 分割），周方向 4 分割とした。鉄筋表面は Iso 要素を用いた場合，周方向 4 分割，長さ方向 50 分割とした。 Bar 要素を用いる場合には長さ方向を 50 分割とした。なお，水道水の比抵抗は 3.1 で示した値とした。

図-6 は Iso 要素を用いた解析例（ $D=10\text{mm}$, $B=50\text{mm}$, $R_p=10^0 \text{ cm}$ ）で，鉄筋表面の電流密度の等高線を示している。電流がセンサー直下に集中している状況がうかがえる。図-7，図-8 に各々カブリ $B=10, 50\text{mm}$ の場合に 2 つの要素を用いて解析したインピーダンス特性曲線と実験値との比較を示す。いずれのカブリの場合にも周波数の減少とともに見掛けのインピーダンスが増大する傾向を示しており，解析と実験とは良好に一致している。但し，カブリ $B=10\text{mm}$ の高周波域では解析に用いた要素による差が若干みられる。すなわち， Bar 要素の結果は Iso 要素の結果よりも大きくなっており，小さいカブリのモデルでは Bar 要素の値の評価には注意を要する。

次に Iso 要素を用いた解析から得たインピーダンス特性曲線を用いて逆推定した R_s, R_p と実験で直接測定した値との比較を 2 ケース示す。

Case-1: $B=10\text{mm}$, $f_H=400\text{Hz}$, $f_L=0.1\text{Hz}$ の場合，
見掛け値 $R_{tap}(f_H)=0.120\text{k}$ ， $R_{tap}(f_L)=0.689\text{k}$
推定値 $R_s=3.59\text{k cm}^2$ ， $R_p=107.5\text{k cm}^2$
実験値 $R_s=4.35\text{k cm}^2$ ， $R_p=95.7\text{k cm}^2$

Case-2: $B=50\text{mm}$, $f_H=400\text{Hz}$, $f_L=0.01\text{Hz}$ の場合，
見掛け値 $R_{tap}(f_H)=0.347\text{k}$ ， $R_{tap}(f_L)=4.135\text{k}$
推定値 $R_s=20.1\text{k cm}^2$ ， $R_p=1,046\text{k cm}^2$
実験値 $R_s=21.7\text{k cm}^2$ ， $R_p=923\text{k cm}^2$

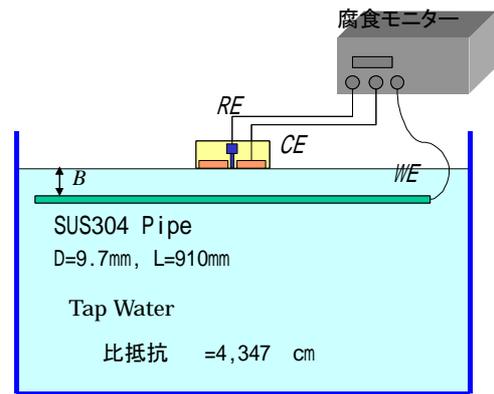


図-5 水槽実験概要図

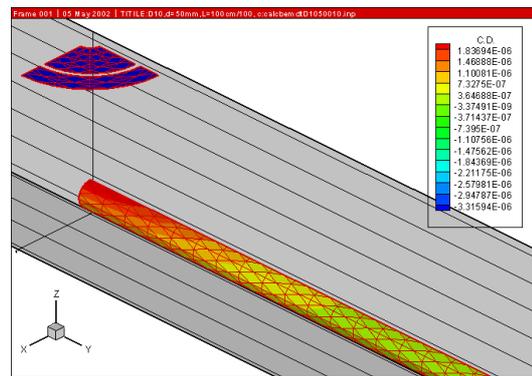


図-6 解析例(電流密度等高線 D10, B=50mm)

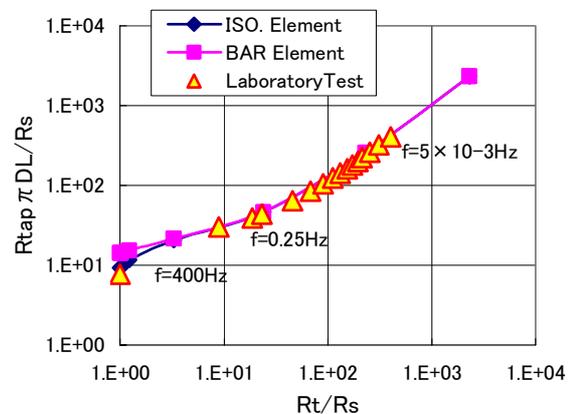


図-7 実験値と解析値の比較(B=10mm)

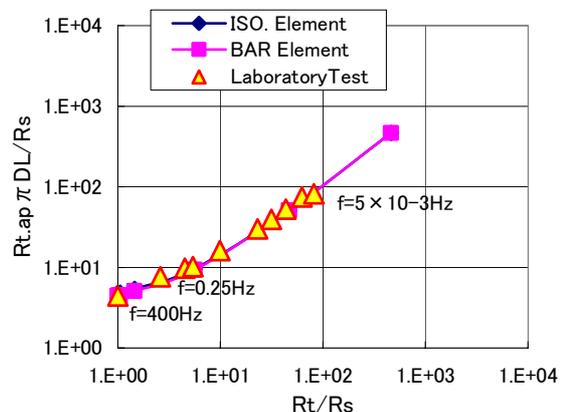


図-8 実験値と解析値の比較(B=50mm)

上記の比較からは、逆推定法の誤差は最大でも 20% 程度に収まっており、この逆推定法は溶液中の鉄筋に対して十分な精度を有していると判断でき、コンクリート中の鉄筋に関しても有効な手法と成り得ると考えられる。

4. インピーダンス特性に及ぼす各種パラメータの影響評価

この逆推定法の精度を上げるには、測定対象となる実構造物の各諸元をできる限り正確に把握しモデルに反映させる必要があるが、しかしながらそのための調査には手間がかかり、またその調査法の精度にも限界がある。したがって今後のこの手法の実用化にあたってはインピーダンス特性曲線に与える各種パラメータの影響を定量的に評価し、推定精度の限界を見極めていく必要がある。そこでここでは基本的なパラメータとして、コンクリート比抵抗 R_t/R_s 、カブリ B 、鉄筋径 D 、鉄筋長さ L に注目し、BEM 解析を用いて以下の 4 ケースでその影響を評価した。

解析モデルは 3.2 で記したものと同一とし鉄筋は *Bar* 要素でモデル化した。

Case1: $D=10\text{mm}, L=200\text{cm}, B=50\text{mm}$ の条件下でコンクリート抵抗 R_t/R_s を 0.1k, 1k, 10k cm とした。

Case2: $D=10\text{mm}, L=200\text{cm}, R_t/R_s=10\text{k}$ cm の条件下でカブリ B を 1, 3, 5, 10cm とした。

Case3: $B=30\text{mm}, L=200\text{cm}, R_t/R_s=10\text{k}$ cm の条件下で鉄筋径 D を 1.0, 1.5, 2.0, 3.0cm とした。

Case4: $D=10\text{mm}, B=50\text{mm}, R_t/R_s=10\text{k}$ cm の条件下で鉄筋長さ L を 1, 3, 5m とした。

Case1 の結果を図-9 に示す。 R_t/R_s を変化させた各々のインピーダンス特性曲線は変化範囲が異なるものの全てが同一の曲線上で重なっている。この特徴はインピーダンス特性曲線を計算する上で極めて有効となる。すなわち解析で事前にコンクリート比抵抗が定まっている必要はなく、適当な値を用いて計算しても同じインピーダンス特性曲線が得られるということである。

Case2 の結果を図-10 に示す。 B が大きくなると低周波側で変化はないが高周波側のインピー

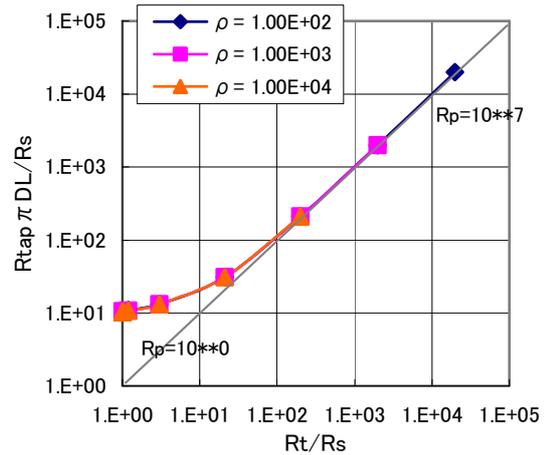


図-9 比抵抗 R_t/R_s の影響 ($D=10\text{mm}, B=50\text{mm}$)

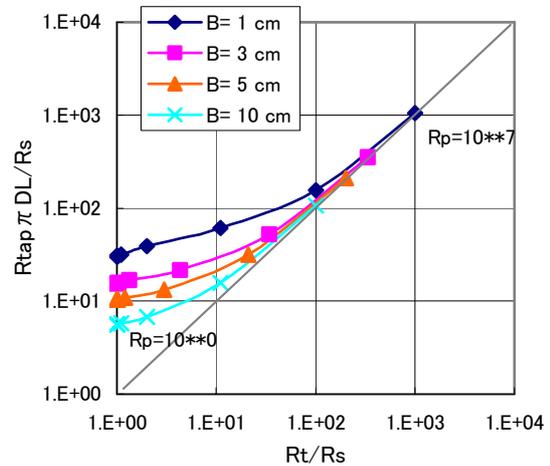


図-10 カブリ B の影響 ($D=10\text{mm}, L=200\text{cm}$)

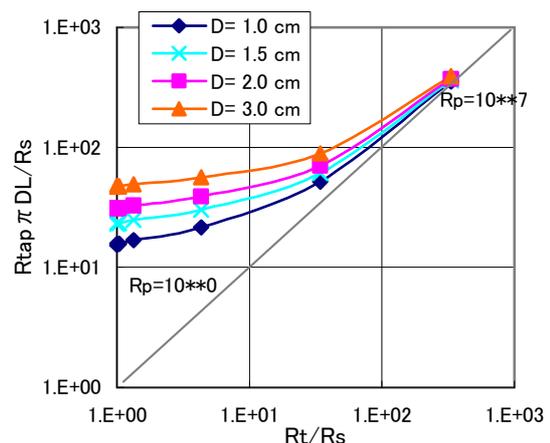


図-11 鉄筋径 D の影響 ($B=30\text{mm}, L=200\text{cm}$)

ダンス特性値は小さくなり、全体として 45 度の直線に近づく。このことは低周波側では B の影響が少なくなり全表面が一様に分極される状態

に近づいていくことを示している。この図から $B=3\text{cm}$ の高周波域の Y 軸値は、 $B=1\text{cm}$ の約 0.5 倍となっており、解析に用いるカブリ値の精度確保は重要であるといえる。

Case3 の結果を図-11 に示す。D の影響も B と同様な傾向を示しているが、 $D=1.5\text{cm}$ の高周波域の Y 軸値は、 $D=1.0\text{cm}$ の約 1.5 倍となっており D を乗じた影響がそのまま現れている。即ち、高周波域の見かけのインピーダンスへの鉄筋径の影響は少ないといえる。

Case4 の結果を図-12 に示す。L の増加の影響も上記と同様の傾向を示している。しかし、L の増加による変化幅は少なくなる傾向が見られ、一定の曲線に収斂していくものと思われる。

以上の結果から鉄筋の幾何学的寸法がインピーダンス特性に大きく影響しており、構造物の真のインピーダンス測定値を推定する上では鉄筋の径を含めた各寸法の正確な把握が不可欠であるといえる。

5. まとめ

筆者らが開発した見掛けのインピーダンス測定値から真のインピーダンスを逆推定する手法についてその妥当性を実験的に検討するとともに、インピーダンス特性に与える各種パラメータの影響について調査した結果、以下のことが結論される。

- (1) BEM 解析による逆推定法は、コンクリート中鉄筋についても有効となる可能性がある。
- (2) インピーダンス特性曲線を計算するにあたり、*iso*.要素は水槽実験と良好な一致を示しており十分な精度が確保される。
- (3) インピーダンス特性曲線を計算するにあたり、*Bar* 要素の適用は有効ではあるが、カブリの小さいモデルでは、*iso*.要素を用いた場合に比べ若干大きめの値を示すため、その評価にあたっては十分な注意を要する。
- (4) ここで示した無次元化手法では、インピーダンス特性曲線の計算においてコンクリート比抵抗を任意の値とすることができる。

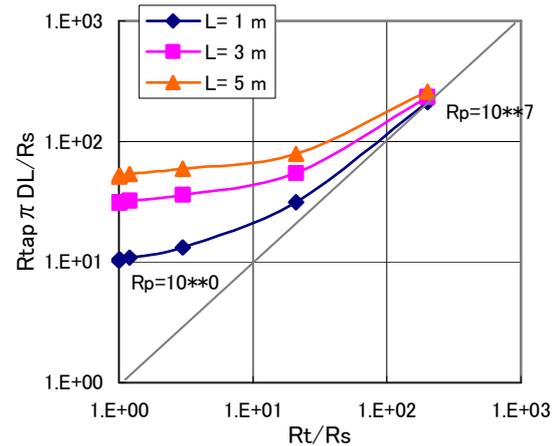


図-12 鉄筋長 L の影響 ($D=10\text{mm}$, $B=30\text{mm}$)

- (5) インピーダンス特性曲線の計算では、鉄筋のカブリ、径、長さ等の幾何学的特性値の正確な把握が重要である。

参考文献

- 1) 荒木弘裕, 関 博, 金子雄一: コンクリートのかぶりを考慮した分極抵抗および分極電流の分布について, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp53-61, 1998.5
- 2) 横田 優, 上田隆雄: 建設後 24 年を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, 2000.9
- 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, pp173-186, 2001.2
- 4) Kazumi M., Hiroshi K. et al.: Corrosion Monitoring for Reinforcing Bars in Concrete, ASTM STP 1065, pp.103-117, 1990
- 5) 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
- 6) 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, 2002.9