

論文

[1090] 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モニタリング

正会員○後藤信弘（新日鐵第二技術研究所）
 松岡和巳（新日鐵設備技術本部）
 伊藤 叙（新日鐵第二技術研究所）

1. はじめに

コンクリート中の電気化学的な鉄筋腐食モニタリング法としては、簡便に腐食発生の可能性を評価できる自然電位法が、フィールドで広く使用されるようになってきている。しかし、自然電位は腐食速度に関する情報を与えるものではないため、鉄筋の腐食を評価する上でこの手法だけでは十分とは言えない。それゆえ、フィールドにおける腐食程度の定量的モニタリング法（交流インピーダンス法、分極抵抗法等）の開発¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が最近活発に行われている。

これらの手法をフィールドでの測定に適用する場合、プローブから印加する電流の分布がコンクリート中の鉄筋の幾何学的配置（径・かぶり）及びコンクリートの抵抗・界面インピーダンスにより異なる。このため、大面積の鉄筋において如何に測定面積を限定し、同じ基準（単位面積当りの測定値等）にて構造物相互の評価を可能にするかがこれらの手法における大きな課題の1つになる。

この課題に対し、筆者らは鉄筋の測定対象面積を容易に評価し得る2重対極式モニタリング法⁷⁾⁸⁾⁹⁾の開発（図1）を行っている。本手法の特徴は、従来の対極（センター対極）とこの周囲に配置したガード対極との2つの対極を用いて鉄筋を分極することにある。ガード対極から印加する電流は、センター対極から流れる電流の拡散を防止する犠牲電流として用い、センター対極から流れる電流だけを計測して限定された面積における情報を得るものである。

尚、この手法ではプローブの中央に銀/塩化銀参照電極が設けられており、自然電位の測定も同時に行うことができる。

本報では、有限要素法（FEM）による数値解析手法を用いて鉄筋の幾何学的配置・コンクリートの抵抗・界面インピーダンスを変化させ、2重対極方式と1対極方式（対極が1つの3電極法）との特性の差異の検討、及びコンクリート試験体を用いて交流インピーダンス測定を行い、その測定値から両方式における電流分布の差異等を検討したものである。

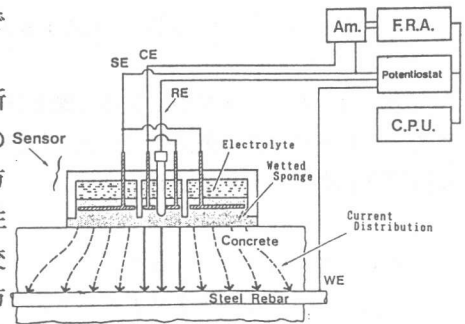


図-1 2重対極式モニタリング法

2. 2重対極方式の電流分布特性に関する数値解析

2.1 解析モデル

本解析では、単鉄筋を有するコンクリート梁モデル（図2(a)）を想定し、コンクリート表面に同電位に保たれた2重のリング状対極（外側をガード対極、内側をセンター対極と呼ぶ）を配置した電位制御方式を仮定した。ここで、上記2つの対極を一体とすれば、従来の対極が1つの3電極法として取り扱うことができる。図2(b)は、2重対極方式の精度を検討するためのコンクリート角柱モデル（通常の実験での測定手法）である。図2における、 ΔE = 過電

圧、 ΔI_s 、 ΔI_c =ガード対極、センター対極の電流、 ΔI =対極の電流である。

一方、鉄/コンクリート界面のインピーダンス特性を表現するために図3に示す界面抵抗モデルを仮定した。すなわち、コンクリート及び界面皮膜の比抵抗をそれぞれ ρ_c 、 ρ_f とし、周波数依存性の界面インピーダンス特性は ρ_f を変化させることで表現することとした。

2. 2 解析手法

電位問題は、数学的にはラプラス方程式を定電位境界条件下で解くことになる。ここでは、この解析手法として、比較的複雑な系であっても良好な解が得られる2次元アイソパラメトリック要素を用いたFEM手法を採用した。

コンクリート梁モデル(図2(a))における分極電流(ΔI_s 、 ΔI_c)は、FEM解析から得られる両対極直下にある各要素内の電流密度を数値積分することで求められる。したがって、2重対極方式によるインピーダンスの絶対値($|Z_d|$)及び1対極方式によるインピーダンスはそれぞれ次式から計算される。

$$|Z_d| = \Delta E / \Delta I_c \quad (1)$$

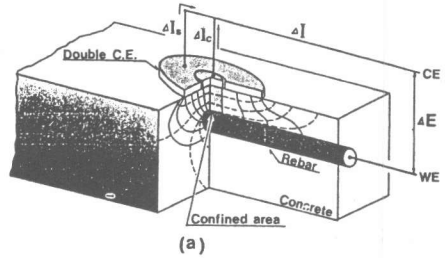
$$|Z_s| = \Delta E / (\Delta I_c + \Delta I_s) \quad (2)$$

一方、コンクリート角柱モデル(図2(b))では、真のインピーダンスの絶対値($|Z_t|$)は解析的に計算され次式で表現できる。

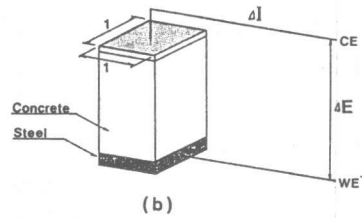
$$\begin{aligned} |Z_t| &= R_s + R_f \\ &= R_s (1 + R_f / R_s) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $R_f / R_s = (l_f / d) * (\rho_f / \rho_c)$
 d =かぶり、 l_f =皮膜厚さ

この解析において対極の寸法は、 $r_s=30\text{mm}$ 、 $r_c=5\text{mm}$ の一定値とし、その他の値は表1に示す範囲で設定した。また、界面の皮膜厚(l_f)はコンクリート中の電流分布への影響を無視できるように設定した。この解析では、 $\rho_f / \rho_c = 1$ の時、高周波数域での応答に対応し、 ρ_f / ρ_c の値が1より小さくなるに従い、より低周波数域での応答に対応することになる。



(a)コンクリート梁モデル



(b)コンクリート角柱モデル

図-2 解析モデル

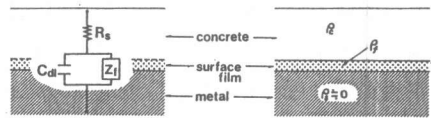


図-3 界面抵抗モデル

表-1 解析に用いた設定値

コンクリートかぶり	$d = 10, 20, 30, 40, 50\text{mm}$
コンクリート比抵抗	$\rho_c = 1\text{k}\Omega\text{cm}$
界面皮膜	$l_f = 1\text{mm}$
界面比抵抗	$\rho_f = 1, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5\text{k}\Omega\text{cm}$
鉄筋径	$D = 10, 15, 20, 25\text{mm}$

2. 3 解析結果と考察

2. 3. 1 電位・電流分布

電位・電流分布の解析結果の一例 ($d=10\text{mm}$, $D=20\text{mm}$ の場合) を図4、図5に示す。これらの図におけるCASE(a)は $\rho_f/\rho_c=1$ 、CASE(b)は $\rho_f/\rho_c=10$ の結果である。過電圧 $\Delta E=100\text{mV}$ で、等電位線 (---) は 10mV ピッチで描かれている。また、電流線 (—) は等電位線と直行するように描いたものである。

鉄筋軸方向の解析結果(図4)から、ガード対極の端では等電位線が曲率を持ち電流が広がる傾向があることがわかる。この傾向は ρ_f/ρ_c が大きくなる

ほど、つまり低周波側になるにつれてかなり広い範囲に及ぶ。しかし、センター対極の直下では殆ど電流が広がっておらず、2重対極方式が有効に働いていることがわかる。

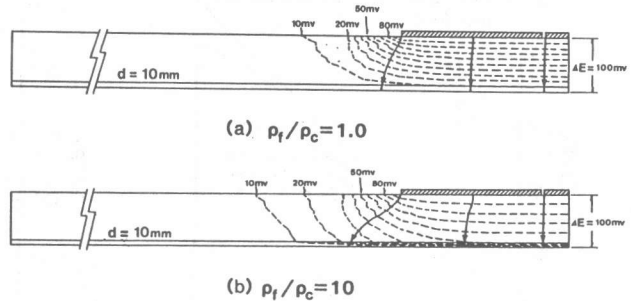
一方、鉄筋断面の結果(図5)からは、 ρ_f/ρ_c による電流分布の変化は殆ど認められない。

2. 3. 2 インピーダンス特性

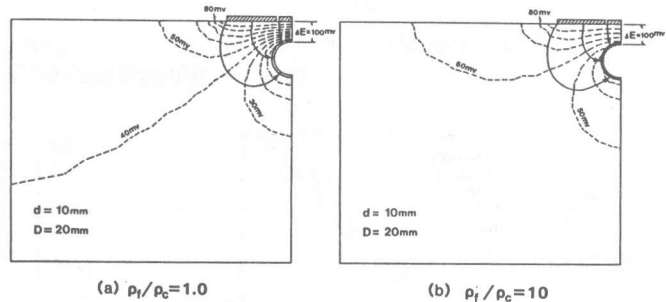
2重対極方式と1対極方式とのインピーダンス特性の差異を検討するために、式(1)~(3)から計算される各インピーダンスの絶対値を $R_s=d*\rho_c$ で無次元化して表記することにする。鉄筋軸方向の結果を図6、鉄筋断面方向の結果を図7に示す。これらの図において、X軸は真のインピーダンス値の無次元化量を示し、Y軸はCASE(a)の場合2重対極方式の計算値、CASE(b)では1対極方式の計算値の無次元化量である。また、X軸上の $|Z_t|/R_s=1$ ($\rho_f/\rho_c=1$) は先に述べたように高周波数域の値を示し、X軸上を右に移動するに従って低周波数域の値に対応する。

これらの図においては、図中の破線(---)からの偏差が電流分布の広がり程度のを示す。図6において、この偏差は、かぶりが大きくなるに従い、あるいは測定周波数 ($f=2\pi\omega$) が低くなると大きくなる。このことは、かぶりが大きくなるか、測定周波数が低くなると鉄筋軸方向にかなり電流が広がっていることを示唆している。しかし、全体としては、2重対極方式の計算結果の偏差が1対極方式の偏差よりも小さく、ガード対極がセンター対極からの電流の広がりを防止していることがわかる。この結果、2重対極方式から得られる値は、かぶり、測定周波数により異なるものの真の値に比較的近く精度が高いと考えられる。しかし、2重対極方式でもかぶりが増すに従い誤差が大きくなる傾向があり、今後、対極の配置や形状と誤差の関係、また鉄筋の腐食状況と $|Z_t|/R_s$ の値との関係などを詳細に検討する予定である。

一方、図7の鉄筋断面方向の結果においても、1対極方式に比べ2重対極方式から得られる値は真の値にかなり近く精度が高いことがわかる。



図一四 鉄筋軸方向の電位・電流分布



図一五 鉄筋断面方向の電位・電流分布

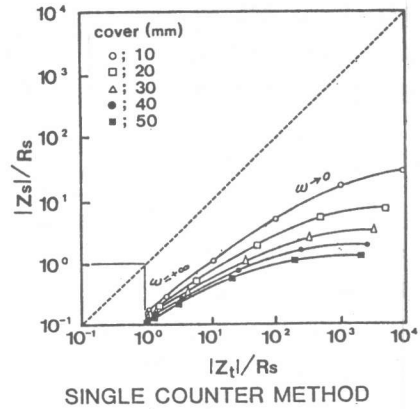
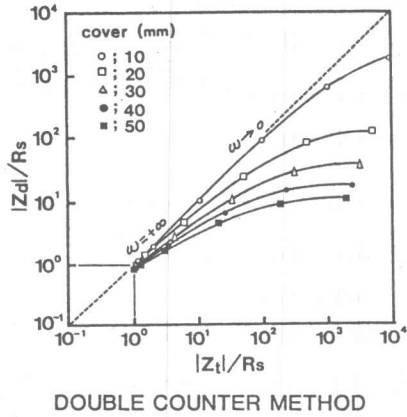


図-6 鉄筋軸方向の解析結果

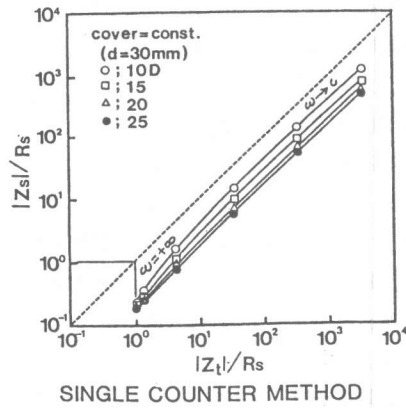
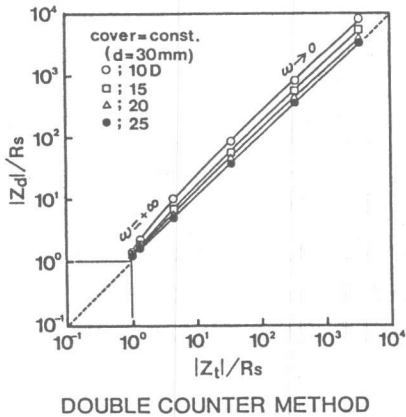


図-7 鉄筋断面方向の解析結果

3. 2重対極方式の電流分布特性に関する実験

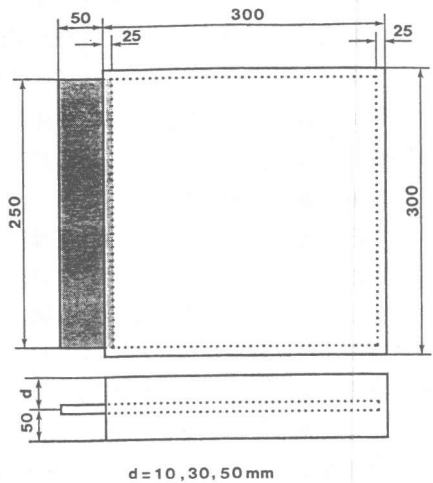
3. 1 実験の概要

本実験は、コンクリート中の鋼板を用い、2重対極方式と1対極方式で交流インピーダンス測定を行い分極抵抗を求め、単位面積当りの分極抵抗はほぼ同じであると仮定し、測定値の大きさから測定電流の広がりを検討した。

3. 2 試験体の製作および実験内容

実験に用いた試験体を図8に示す。コンクリート中には、表面を研磨紙（黒皮除去80番、仕上げ220番）で磨き、裏面にはエポキシ塗装（厚さ0.2mm程度）を施した厚さ6mmの鋼板を埋め込んだ。

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、大井川産川砂を用いた。コンクリートは水セメント比59%、単位セメント量288kg/m³、単位粗骨材量957kg/m³、単位細骨材量842kg/m³、最大骨材寸法10mm、スランプ15cmとした。また、試験体のかぶり厚は、10mm、30mm、50mmの3種類とした。



d = 10, 30, 50 mm

図-8 試験体

実験は、約3カ月程室内で養生し、試験体中央部を測定点とし交流インピーダンス測定を行った。

測定装置は、ポテンションスタット、周波数応答解析装置、制御用マイコンを用いた。対極は、外径60mm、内径40mmの2重対極式センサーと径40mmの従来方式のセンサーを用い、両方式とも測定に關与する対極の面積を等しくした。

なお、測定はコンクリート中の鋼板を自然電位に制御し、1mmHz～10kHzの周波数について行った。

3. 3 測定結果と考察

図9に2重対極方式による交流インピーダンス測定結果のBODE線図の一例を示す。コンクリート中の鋼材の測定結果は、コンクリートの抵抗が高いため溶液中の鋼材の測定結果等では觀察される溶液抵抗および分極抵抗を明確に示さない。一方、COLE-COLE PLOTの一例を図10に示す。この図は半円状の軌跡を描き、実数軸との交点がコンクリートの抵抗および分極抵抗を示すことになる。本実験における分極抵抗は、この交点を測定値から外挿し2つの交点の差とした。

図11にかぶりと分極抵抗との関係およびかぶりによる1対極方式で得られる分極抵抗 ($R_{p.s}$) と2重対極方式の分極抵抗 ($R_{p.d}$) の比 ($R_{p.s}/R_{p.d}$) の変化を示す。

かぶりと分極抵抗との関係は、2重対極方式および1対極方式ともに、かぶりが増加するに従い分極抵抗も増加する傾向がある。この理由としては、鋼材の表面の不働態が破壊され活性な腐食反応が行われていると仮定すれば、酸素の透過性能等が腐食反応を律速していると推測できる。また、不働態が健全である場合には、各試験体で不働態被膜がわずかに異なり、この差が測定値に影響を及ぼしたものと推察される。しかし、同じ試験体における2重対極方式と1対極方式の測定値は大きく異なる。この理由としては、測定用対極の面積が両方式で等しいことから、コンクリート中の鋼板の単位面積当りの分極抵抗が全面積においてほぼ等しいと仮定すれば、各方式による測定面積の相違が挙げられる。

そこで、 $R_{p.s}/R_{p.d}$ を求め、かぶりとの関係を図11に示した。この図より、かぶりが増加するに従いこの比は低下することがわかる。かぶり10mmにおいては、この比は28%である。このことは、

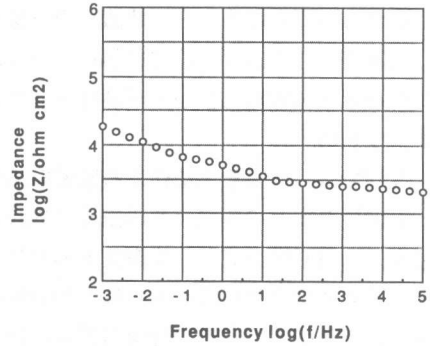


図-9 BODE線図

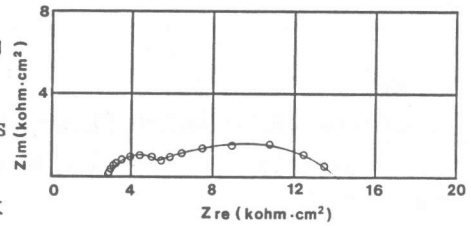


図-10 COLE-COLE PLOT

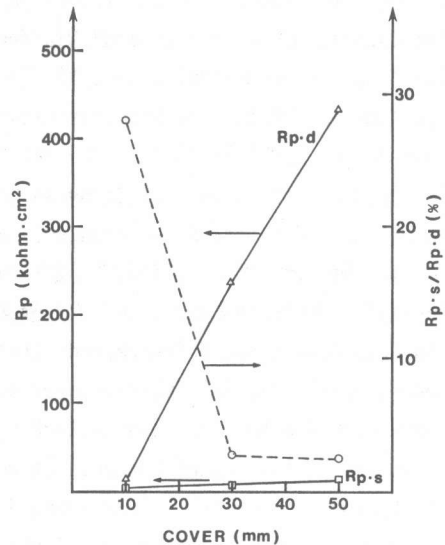


図-11 かぶりと分極抵抗、 $R_{p.s}/R_{p.d}$ の関係

測定値が測定された鋼板上の単位面積当りの分極抵抗の並列回路として計測されるため、1対極方式による測定面積は、2重対極方式による測定面積の約3.6倍(=1/0.28)になっていることを示している。同様に、かぶり30mmでは、約3.6倍になっており、かぶりが増加するに従い1対極方式の電流分布は大きく広がることになる。また、かぶり50mmでのRp.s/Rp.dの値が30mmでの値とほぼ等しいのは、かぶり30mmの試験体で1対極方式による測定面積が既に鋼板全面に及んでおり、かぶり50mmの場合、試験体の大きさが電流の広がりを制約したと考えられる。

これらの測定結果から、数値解析で得られた結果と同様に1対極方式ではかぶりの増加に伴い電流が大きく広がる傾向を示し、一方、2重対極方式では、ガード対極からの電流によりセンターからの電流の広がりが制御されていることがわかる。

4. まとめ

本報では、有限要素法による数値解析および交流インピーダンス測定を行い、2重対極方式と1対極方式との電流分布の差異を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 2重対極方式の鉄筋腐食モニタリング法は、従来の1対極方式に比べ測定範囲を特定でき、その範囲の分極抵抗を比較的高い精度で測定することが可能である。

(2) コンクリート中の分極電流は、鉄筋の周方向にはほとんど広がらず、鉄筋の軸方向に沿ってかなり広がる傾向がある。また、その程度はコンクリートのかぶり、および測定周波数に依存する。

参考文献

- 1) J. L. Dawson, L. M. Callow, K. Hladky, and J. A. Richardson: Electrochemical Impedance Measurements Applied to the Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. NACE Corrosion/78, 1978, paper 125.
- 2) K. Matsuoka, H. Kihira, S. Ito, and T. Murata: Monitoring of Corrosion of Reinforcing Bar in concrete. NACE Corrosion/87, 1987, paper 121.
- 3) E. Escalante, E. Whinton, and F. Qiu: Measuring the Rate of Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete—Final Report, NBS Report, 1986, NBSIR 86-3456.
- 4) H. Tamura, and M. Yoshida: Nondestructive Method of Detecting Steel Corrosion in Concrete. ACI, SP82-35, 1984, pp. 689-702.
- 5) K. Okada, K. Kobayashi, and T. Miyagawa: Corrosion Monitoring Method of Reinforcing Steel in Offshore Concrete Structures. ACI, SP82-36, 1984, pp. 703-720.
- 6) 小林一輔, 辻 恒平, 星野富夫: 鋼材の腐食診断への分極抵抗法の適用、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、1988, pp. 103-108.
- 7) N. Goto, K. Matsuoka, H. Kihira, and S. Ito: Corrosion Monitoring for reinforcing Bars in Concrete, ISIJ, EVALMAT 89, 1989, paper 90.
- 8) D. G. John, D. A. Eden, J. L. Dawson, and P. E. Langford: Corrosion Measurement on Reinforcing Steel and Monitoring of Concrete Structures, NACE, Corrosion/87, 1987, paper 136.
- 9) S. Feliu, J. A. Gonzalez, M. L. Escudero, S. Feliu jr, and M. C. Andrade: Possibilities of the Guard Ring for the confinement of the Electrical Signal in Polarization Measurements of Reinforcements, NACE, Corrosion/89, 1989, paper 623.