

V-252 鉄筋の腐食等価電気回路モデルについて

京都大学工学部 学生員○酒瀬川唯 正員 井上晋
 積水ハウス株式会社 正員 築地光雄
 京都大学工学部 正員 宮川豊章 正員 藤井学

1. はじめに

極めて腐食し難いと考えられていたコンクリート中の鋼材が Cl^- イオンの働きにより腐食する事例が近年数多く報告されている。わが国でも本格的な海洋コンクリート構造物が増加するにしたがって、鋼材腐食による構造物の劣化が重要な問題となっている。したがって、明確な補修方法および防食方法の確立、腐食の早期発見のために、コンクリート中での鋼材の腐食診断法を確立することが求められている。

鋼材腐食の非破壊推定手法としては、自然電位法をはじめとして種々の手法が提案されているが、近年注目されている手法として交流インピーダンス法がある。しかし交流インピーダンス法による測定値を解釈しようとする場合、腐食系の等価電気回路モデルに関する検討が不可欠である。本研究では、従来あまり検討例のなかった鋼材表面に塗膜が存在する系を含めて腐食モデルの基本的な資料を得ようとしたものである。

2. 実験概要

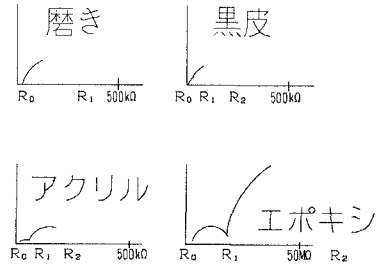
鋼材として黒皮付き鉄筋、磨き鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、アクリルエマルジョン塗装鉄筋の4種類を取り上げ、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ コンクリート円柱供試体に埋設した。シリーズ1としては照合極として塩化銀電極を用い、シリーズ2としては、分極抵抗法の簡便法として照合極に試料極と同様の鉄筋を用いることが多いことを考慮して、試料極として埋設した鋼材を用いた。供試体の詳細を表1に示す。コンクリート($\text{W/C}=60\%$)の練り混ぜ水として食塩水(3.13%)を用い、材令1日目より供試体の底面から高さ10 cmまでを食塩水(NaCl 3.13%)中に浸漬させた。測定法として交流インピーダンス法を用い、周波数0.001~100kHzの範囲で測定した。今回は材令24日目の測定結果を報告する。

表1 供試体の一覧表

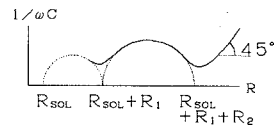
シリーズ1				シリーズ2			
供試体	照合極	試料極	対極	供試体	照合極	試料極	対極
黒皮	AgCl	黒皮	黒皮	黒皮	黒皮	黒皮	黒皮
磨き	AgCl	磨き	磨き	磨き	磨き	磨き	磨き
エポキシ	AgCl	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ	エポキシ
アクリル	AgCl	アクリル	アクリル	アクリル	アクリル	アクリル	アクリル

3. 結果および考察 シリーズ1 標準電極を使用した場合

測定結果をコールコールプロットによって表わした概形を図1に示す。また測定結果をシリーズ2も含めて表2に示す。なお、以下本文中の記号については、図1で定義したものをを用いる。全体として明瞭なWarburgインピーダンスによる抵抗成分は現われなかった。このことより今回用いた周波数では、Warburgインピーダンスを明確にはとらえることができなかったものと考えられる。磨き供試体では円弧が1つのみ現われたことから、塗膜が存在しないことを考えるとこれは鋼材の腐食によるものと考えられる。よって、 R_0 は液抵抗(R_{sol})を、 R_1 は分極抵抗(R_c)を表わすものと推定される。黒皮供試体では円弧が2つ現われている。これには種々の解釈が可能であるが、鉄筋上の黒皮が一種の塗膜のような働きをしたためであると解釈することができる。よって、 R_1 と R_2 のうちのいずれかが黒皮の抵抗であり、いずれかが鋼材本体の分極抵抗であると考えられる。黒皮の方が組織が密ではなく、腐食速度が大きいため、 R_2 が鋼材そのものの分極抵抗であると推定される。エポキシ供試体では、1つの小さな半円とそれに続く非常に大きな半円とが表われている。エポキシ樹脂が高い電気抵抗を持つことから、この非常に



各グラフの概形



グラフの一般形

図1 コールコールプロット

大きな半円は塗膜によるものであらうと考えられるが、小さな半円についてはそのメカニズムは明らかでない。したがって、 R_0 は液抵抗を、 R_1 はエポキシと水溶液の界面上に存在している何らかの層を表わし、 R_2 がエポキシ樹脂塗膜の抵抗(R_{fp})を表わしているものと考えられるが、塗膜抵抗による円の次にさらに大きな分極抵抗を表す円が存在するであろうことが推定される。アクリル供試体については、非常に小さい虚軸につぶれた半円と、磨き供試体の分極抵抗より小さめの半円が表われている。この非常に小さい半円については、それにより得られる抵抗値が、磨き供試体および黒皮供試体のどの部分にも対応していないことから、アクリル樹脂塗膜そのものの抵抗およびアクリル樹脂塗膜表面に存在する周波数依存成分によるものと推定される。したがって、 R_0 が液抵抗を、 R_1 がアクリル樹脂塗膜の抵抗等塗膜に何らかの形で関係のある何かを、 R_2 が鋼材の分極抵抗を表わしているものと考えられる。

以上の結果から推定した、磨き、黒皮、エポキシ、アクリル供試体の腐食等価電気回路モデルを図2に示す。なお、今回用いた測定周波数では、0.001Hz以下の挙動は追跡できないので、図2の等価モデルにさらに直列に接続する周波数依存成分が存在する可能性もある。従来の研究例を参照すれば、磨き供試体、黒皮供試体については、ほぼここで提案したモデルで満足できるものと考えられる。しかし、エポキシ供試体、アクリル供試体については塗膜の影響が考えられるため、これらの等価モデルについてはさらに検討を加える必要がある。また、今回用いた周波数では、低周波数域まで十分追跡したとはいえず、特に塗膜付き鉄筋については、この領域についてさらに検討して行くことが望まれる。

シリーズ2 標準電極を使用しない場合

グラフの概形についてはシリーズ1と同様なものとなった。標準電極を使用した場合と比較すると磨き供試体、黒皮供試体については大きな値となっている。これは交流インピーダンス法による場合、矩形波電流分極法などと異なっており、極めて長時間電流を印可することになるため、腐食系への何らかの干渉が起こり、照合極として普通鋼材等を用いることが困難になるためと推定される。しかし、エポキシ、アクリル供試体についてはほぼ同様の値をとっている。したがって、高い抵抗を有する塗膜付き鉄筋の場合には、標準電極の使用は測定値に大きく影響しないものと考えられる。このことより、塗膜付き鉄筋の測定に際しては、コンクリート中の鋼材を照合極として用いても問題は生じないが、黒皮鉄筋など塗膜を持たない鋼材を測定する場合には標準電極を使用することが望ましい。

腐食モデルの検討はまだ端緒についたばかりで種々の解釈が可能であり、今後さらに検討を続けていく予定である。なお測定値の経時変化等詳細については当日口頭でも発表する。

謝辞 実験に際して多大なご協力をして下さった日本ペイント株式会社みなさんに感謝いたします。

<参考文献> 1) Claude Gabrielli : Identification of Electrochemical Processes by Frequency Response Analysis, 1980.9、2) 永山政一、他：周波数分析器によるアノード酸化被膜のインピーダンス測定

表2 交流インピーダンス法による測定値

シリーズ1				測定値 (単位: $R: k\Omega \cdot cm^2, \omega: Hz$)				
供試体	照合極	試料極	対極	R_0	R_1	ω_{max1}	R_2	ω_{max2}
1 Φ *矽	AgCl	1 Φ *矽	黒皮	2.611	778.07	7.94×10^3	122454	0.001以下
7 Φ 黒	AgCl	7 Φ 黒	黒皮	4.413	2.0877	10^5 以上	193.21	2.51×10^{-3}
黒皮	AgCl	黒皮	黒皮	2.882	43.080	1.59×10^{-2}	104.96	0.001以下
磨き	AgCl	磨き	磨き	1.859	24.438	2.51×10^{-2}	—	—

シリーズ2				測定値 (単位: $R: k\Omega \cdot cm^2, \omega: Hz$)				
供試体	照合極	試料極	対極	R_0	R_1	ω_{max1}	R_2	ω_{max2}
1 Φ *矽	黒皮	1 Φ *矽	黒皮	8.355	717.5	1.0×10^4	124600	0.001以下
7 Φ 黒	黒皮	7 Φ 黒	黒皮	4.465	2.742	10^5 以上	192.27	2.51×10^{-3}
黒皮	黒皮	黒皮	黒皮	3.838	96.9	2.51×10^{-3}	172.8	0.001以下
磨き	磨き	磨き	磨き	3.446	389.4	0.001以下	—	—

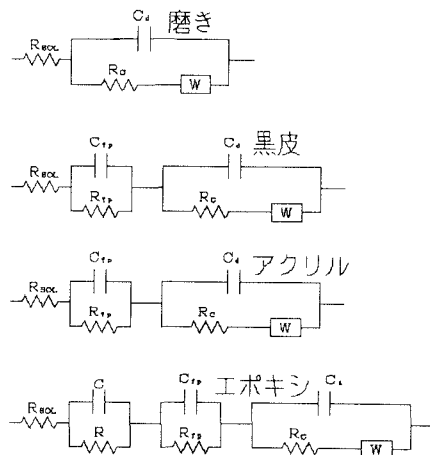


図2 腐食等価電気回路モデル例