

コンクリート中で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 正員 宮川豊章
正員 藤井学 積水ハウス株式会社 正員 築地光雄

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、腐食による構造物の劣化が重要視されてきた。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も、コンクリート中での鋼材の腐食系をモデル化することによって腐食診断法を確立することが求められている。

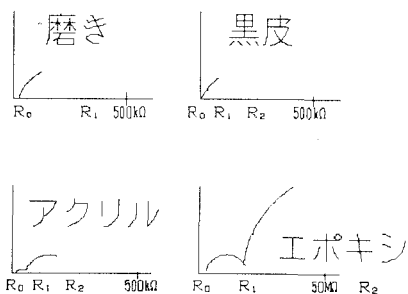
2. 実験概要 シリーズ1 腐食等価回路モデルの検討 鋼材として黒皮付き鉄筋、磨き鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、アクリルエマルジョン塗装鉄筋の4種類を取り上げ、試料極、照合極、対極には全て同種の鋼材を用いた。また腐食環境としては、練り混ぜ水として海水相当濃度食塩水(3.13%)を用いた普通コンクリート(W/C=60%)と、コンクリート中液相のモデルとして海水相当濃度食塩水を水酸化カルシウムで飽和させた水溶液の2種類を用いた。供試体としては、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 円柱供試体と、 $\phi 16 \times 20 \text{ cm}$ トールビーカに飽和水酸化カルシウム溶液を1リットル入れたものを用いた。

シリーズ2 各種防食方法の評価 鋼材として黒皮付き鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、アクリルエマルジョン塗装鉄筋、ポリマーセメント系塗装鉄筋の4種類を取り上げた。またコンクリートとしては軽量気泡コンクリートとALCコンクリートの2種類を取り上げた。軽量気泡コンクリート供試体として $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$ 円柱供試体を、ALC供試体として $85 \times 65 \times 150 \text{ mm}$ 角柱供試体を用いた。腐食を促進するために、5%NaCl水溶液に8時間浸漬した後、16時間 50°C で熱風乾燥した。これを1サイクルとし、初回の測定以降2.5サイクル毎に測定を行なった。なお、シリーズ1、シリーズ2ともに、腐食モニタリング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。

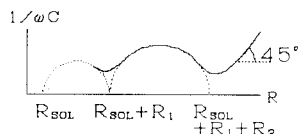
3. 結果および考察 シリーズ1 腐食等価回路モデルの検討

交流インピーダンス法による測定結果をコールコールプロットにより表わしたものを図1に示す。なお、以下本文中の記号については、図1で定義する。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インピーダンスをとらえることができなかったと考えられる。磨き鉄筋では円弧が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。黒皮付き鉄筋では円弧が2つ現われている。これは、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考えられる。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、腐食速度が大きいと考えられるため、 R_2 が鋼材そのものの分極抵抗であると推定される。エポキシ樹脂鉄筋では、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、この非常に大きな半円は塗膜によるものであろうと考えられるが、小さな半円についてはそのメカニズムは明らかでない。小さな半円の原因としては、小さな半円より得られる抵抗値が、磨きおよび黒皮の分極抵抗値に近いことから、塗膜下の鋼材腐食による場合と、塗膜に



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

Tadasi SAKASEGAWA, Susumu INOUE, Toyoaki MIYAGAWA, Manabu FUJII, Mitsuo TSUKIJI

ピンホールがある場合とが考えられる。塗膜下の鋼材腐食による場合は、エポキシの透水性が非常に小さく、鋼材の腐食が生じていない可能性がきわめて高いことを考え併せると、分極抵抗は無限大に大きな値をとるはずであり、その可能性はないものと思われる。ピンホールによる場合であってもやはりその腐食速度は小さいものと考えられ、ピンホールによるものでもないと考えられる。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_{fe})を表わしているものと考えられる。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い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、磨き供試体および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。

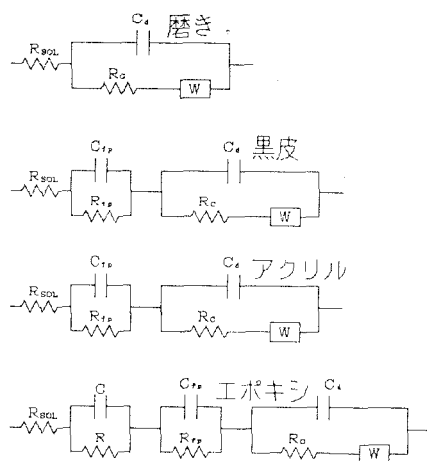


図2 等価回路モデル

シリーズ2 各種防食方法の評価 シリーズ1、シリーズ2とも同じ鋼材を用いているので、グラフの概形には変化はみられなかった。各サイクルでの抵抗値を表1に示す。黒皮付き鉄筋では分極抵抗はシリーズ1の黒皮供試体よりも小さい。これは、シリーズ2では促進腐食試験を行なっている上に、軽量気泡コンクリートを用いているためにシリーズ1に比べて鋼材の腐食が早く進行しているものと考えられる。しかし、アクリル樹脂鉄筋については、シリーズ2による分極抵抗は、シリーズ1による分極抵抗よりもかなり大きい。シリーズ2の鉄筋が、シリーズ1の鉄筋よりは、腐食が進行しているであろうことを考え併せると、初期には腐食が磨きよりも速く進行するが、その後塗膜中の防錆剤等の効果によって、溶解した鉄イオンとアクリルが結合、緻密化し、時間の経過とともに、分極抵抗が高まるものと考えられる。エポキシ樹脂鉄筋での顕著な違いは、シリーズ1では非常に大きな塗膜抵抗の前に、小さな半円が現われているのに対し、シリーズ2では測定不能となるほど大きな抵抗を示したことである。シリーズ1とシリーズ2ではコンクリートの成分が異なることから、シリーズ1のコンクリート中に層を形成する何らかの成分が含まれていたものと考えられる。

今回の実験に際し、多大な協力をしてくださった日本ペイント株式会社の皆さんに感謝いたします。

表1 シリーズ2の測定結果

単位	BLANK1			BLANK2			アクリル1			アクリル2		
	サイクル			サイクル			サイクル			サイクル		
$K\Omega \cdot cm^2$	0	25	50	0	25	50	0	25	50	0	25	50
液抵抗	0.548	0.279	0.304	1.149	0.501	0.304	1.044	7.833	2.030	2.089	***	1.012
被膜抵抗	4.961	0.585	0.203	8.042	0.334	0.203	19506	412.8	465.8	4748.8	373.9	142.8
分極抵抗	52.2	3.561	0.81	44.3	1.554	1.215	127.4	220.1	89.1	340.5	501.3	18.23

単位	※リファセメント1		※リファセメント2		※リファセメント3	
	サイクル		サイクル		サイクル	
$K\Omega \cdot cm^2$	0	25	0	25	0	25
液抵抗	1.619	1.012	***	***	***	1.012
被膜抵抗	11165	2733.8	22432	2733.8	21241	354.4
分極抵抗	8.72	302.7	76.0	52.65	67.4	81.0