

竹中工務店

正会員 ○米 澤 敏 男

GCC Ltd.

V. Ashworth

UMIST

R. P. M. Procter

1. はじめに

鉄筋の腐食状況や腐食環境の変化を非破壊的に把握する腐食モニタリング技術は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を向上させるための技術の一つとして重要であるが、依然として研究途上の課題であり、信頼性のあるモニタリング技術の確立が望まれている。ACインピーダンスは、周波数100 KHzから1 mHz程度で振幅10mV程度の交流を電極に負荷し、この交流に対する電極の応答から、電極の電気化学的状態を把握しようとするものであり、Dawson¹⁾や春山ら²⁾によってコンクリート中の鉄筋の腐食の研究に始めて利用された。腐食研究の電気化学的な手法として、ACインピーダンスは広い可能性を有しているが、鉄筋の腐食モニタリング技術としての可能性や限界は、十分に理解されているとは言えない。この報告は、モルタル中に埋設された鉄筋のACインピーダンスを経時的に測定し、鉄筋腐食のモニタリング技術としてのACインピーダンスの可能性について検討したものである。

2. 実験

外径8mmの鉄筋（エメリーペーパーで800番まで研磨）を埋設した供試体（図1）を飽和Ca(OH)₂水溶液中にモルタルの材令1日から約5か月間浸漬し、その間の腐食電位とACインピーダンスの変化を測定した。モルタルの練り混ぜ水および飽和Ca(OH)₂水溶液には、0, 0.52M, 2.84Mの三種の異った濃度になるようにNaClを加えた。

2-1. 使用材料：モルタルの配合は、w/c=0.50, s/c=1.43であり、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。鉄筋はコンクリート工用棒鋼（SR24相当）である。

2-2. ACインピーダンス測定：交流の発生および負荷した交流に対する応答の解析には、Solarton社の1172型TFA（transfer function analyser）を使用した。負荷した交流は、周波数10 KHzから30 mHz、振幅10mVの正弦波である。ACインピーダンスの測定に用いた電極の構成は、図2に示すような3電極方式であり、開路電位の状態で交流を負荷した。

3. 実験結果と考察

試験した供試体の腐食電位の測定結果を図3に示す。NaClを含まない供試体は、不動態の挙動を代表するが、NaCl添加量0.52Mの供試体も同じく不動態の状態を示した。しかし、NaCl添加量2.84Mの場合は、最初、活性な腐食状態を示すが、その後、不動態化され、20~40日以降再び活性な腐食状態を示した。これらの供試体のうち、NaCl添加量が2.84Mの供試体のACインピーダンスの測定結果を複素平面上で（Cole-Coleプロット）図4に示す。図中には高周波部をさらに拡大したプロットも示してある。このCole-Coleプロットでは、純抵抗

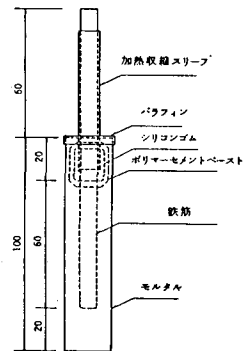


図1 供試体

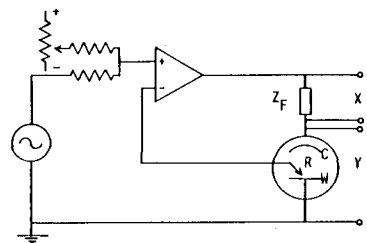


図2 インピーダンス測定システム

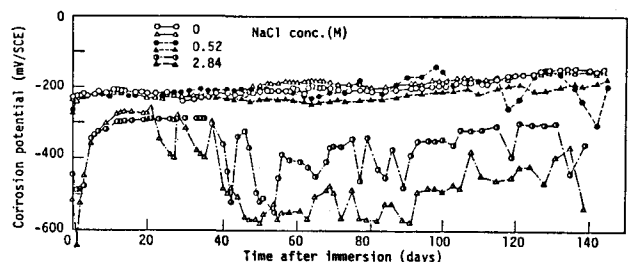


図3 腐食電位

に相当する部分をインピーダンスの実数部から差し引いたものを用いている。図5は、ACインピーダンスの測定結果を $\log|Z| \sim \log w$ 平面に示した（Bodeプロット）ものである。ここで $|Z|$ は、インピーダンスの絶対値、 w は角速度である。Cole-Coleプロットは、ほぼ直線的な低周波部と変形した小さな半円の一部分と考えられる高周波部の二つのプロセスを示している。二つのプロセスの存在は、Bodeプロットにも認められるが、低周波部のBodeプロットの勾配が、 45° であることから、この部分が、ほぼ理想的な抵抗コンデンサ並列回路の挙動を示すことがわかる。これは不動態ないしはそれに近い状態の鋼のインピーダンスの特性である。したがって

Cole-Coleプロット（図4）の低周波部は、腐食に関与するプロセスを示す極めて大きな半円の一部分であり、直線的に見える部分の勾配が小さなものは、半円の径が小さい、すなわち腐食速度が大きいことを示している。図4の低周波部から推定される腐食状態の変化は先に述べた腐食電位から判断される腐食状態とほぼ一致する。腐食速度の絶対値をインピーダンスから求めるためには、モルタル中の鋼のような腐食速度の著しく低いシステムでは、今回の場合よりもさらに低い周波数帯までのインピーダンス測定が必要である。インピーダンス法が、腐食電位や分極抵抗法といったモニタリング技術に比べて優れている点は、腐食速度に関与するプロセスの動きを理論的には正しく把握できる点であるが、鉄筋の腐食モニタリング

のためには、1mHzあるいはそれ以下の低周波数帯での迅速で安定な測定技術が必要である。また鉄筋の腐食モニタリングにACインピーダンスを利用する場合のもう一つの問題は図4の高周波部の小さな半円に見られる腐食とは別のプロセスからの信号である。モルタルは、図4では省略している純粋な抵抗に相当する性質と、このような抵抗とコンデンサーを組み合わせた静電的な性質を有するが、モルタルが、乾燥してくると、この小さな半円部が著しく大きくなり腐食に関与するプロセスからの信号が少なくなることが問題となる場合が考えられる。図6は、

Bodeプロットの 45° の直線部と直線 $w=1$ との交点の $|Z|$ から、 $C=1/|Z|_{w=1}$ の³⁾関係を用いて求めた容量（おそらく電気二重層容量）の変化を示す。NaCl添加量=0の場合この値は $25 \sim 30 \mu F/cm^2$ と典型的な二重層容量の値を示すが、活性な腐食状態や腐食直前の状態では、この容量が大きくなる傾向が見られる。このような容量の変化もACインピーダンスによる腐食モニタリングの一つのパラメータとなりうる可能性が考えられる。ACインピーダンスは鉄筋の腐食モニタリングに適用しうる可能性を有する技術と判断されるが、測定法、制約条件、データの解釈等まだまだ、多くの研究課題を残している。

<参考文献> 1) Dawson et. al., Br. Corros. J., 1981 pp102-106, 2) 春山他, 防食技術, 1980. pp337-342. 3) Haruyama and Tsuru, ASTM STP-727, 1979

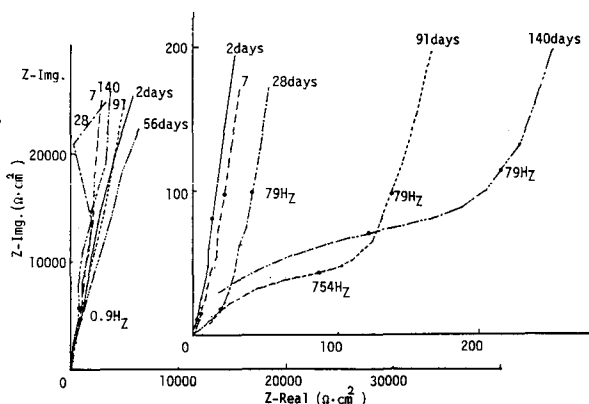


図4 Cole-Coleプロット (NaCl=2.84 M)

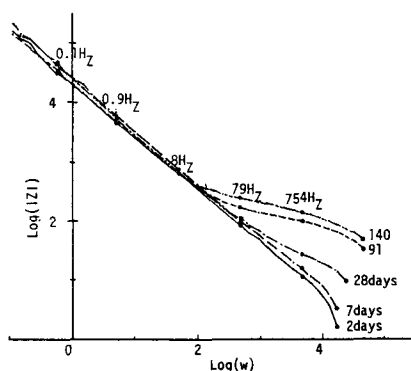


図5 Bodeプロット (NaCl=2.84 M)

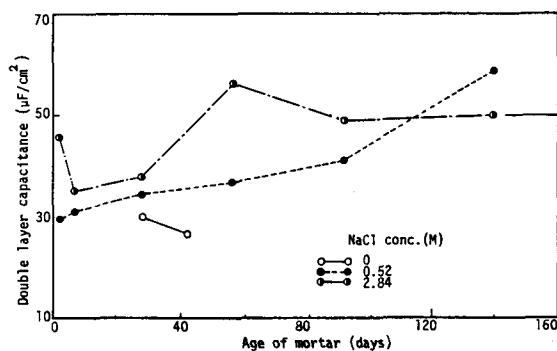


図6 電気二重層容量