

非破壊分極抵抗法および温湿度センサを用いた深いかぶりの試験体に対する腐食評価

(一財) 電力中央研究所
(地独) 大阪産業技術研究所
京都大学大学院

正会員 ○金光 俊徳, 永田 聖二
正会員 左藤 眞市
正会員 高谷 哲, 山本 貴士

1. はじめに

腐食速度を定量的に評価できる分極抵抗法は、鉄筋に一部リード線を導通する必要があるために、既設構造物に対しては適用が困難である。また、臨海の電力土木構造物ではかぶりが深いものが多く、力学作用により生じたひび割れを通じた塩水および酸素侵入による腐食を検知できる評価法が求められている。そこで本研究では、筆者らが開発しているコンクリート表面から測定可能な非破壊分極抵抗法と称する手法¹⁾の深いかぶりの試験体に対する適用性を評価するために、曲げひび割れを導入した鉄筋コンクリート試験体を干満模擬槽に入れて測定した。加えて、腐食発生原因の考察のために鉄筋位置に温湿度センサを埋設し測定した。

2. 測定理論

非破壊分極抵抗法の等価回路を図-1 に示す。この手法はコンクリート表面に 4 個の電極を内部鉄筋に沿って配置し、外側 2 電極で広範囲の周波数の電流を印加し、内側 2 電極で電位差を取得することによってインピーダンスを測定することで腐食指標を算出する。この等価回路はコンクリートのみを流れる電流と鉄筋を経由する電流とを単純化して 2 つの経路として解釈したものである。回路の抵抗 R_1 , R_2 , R'_{p-ni} は、コンクリート表面に置いた 4 端子での交流インピーダンス測定における、鉄筋がない場合のコンクリートの抵抗 R_s , 鉄筋に電流が流入する場合の高周波の抵抗 R_{FH} , 低周波の抵抗 R_{FL} を用いて、以下の式(1), (2), (3)で表される。

$R_1 = R_s \quad (1),$

$R_2 = \frac{R_s \cdot R_{FH}}{2 \cdot (R_s - R_{FH})} \quad (2),$

$R'_{p-ni} = \frac{R_{FL} - R_{FH}}{2 \cdot (1 - R_{FL}/R_s) \cdot (1 - R_{FH}/R_s)} \quad (3)$

続いて被測定面積 $A_{ni}(\text{cm}^2)$, および電位差測定端子と電流端子とを分けることによる過小評価を補正する係数(端子配置倍率) $r_{2/4}$ を R'_{p-ni} に乗じて非破壊分極抵抗 $R_{p-ni(2)}(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ を式(4)により算出する。

$R_{p-ni(2)} = r_{2/4} \cdot R_{p-ni(4)} = r_{2/4} \cdot A_{ni} \cdot R'_{p-ni} \quad (4)$

この $R_{p-ni(2)}$ が 3 電極法による分極抵抗 $R_p(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ とほぼ一致する指標となる。

3. 実験概要

図-2 に試験体の寸法および電極配置を、表-1 に試験要因を示す。試験体の形状は $200 \times 200 \times 600\text{mm}$ で、水セメント比 $W/C=55\%$, 粗骨材の最大寸法は 13mm , 細骨材率 48.7% とした。鉄筋のかぶりは 100mm とした。またひび割れ幅は 0.4mm , 補修はエポキシ樹脂注入工法とした。交流インピーダンス測定は、印加電圧を $1.0(\text{V})$ とし、周波数を $80\text{mHz}-1\text{kHz}$ として 2 つの配置方法で行った。すなわち、外側 2 端子間隔を $D_{out}=240\text{mm}$, 内側 2 端子間隔を $D_{in}=200\text{mm}$ とした配置で R_{FH} , R_{FL} を算

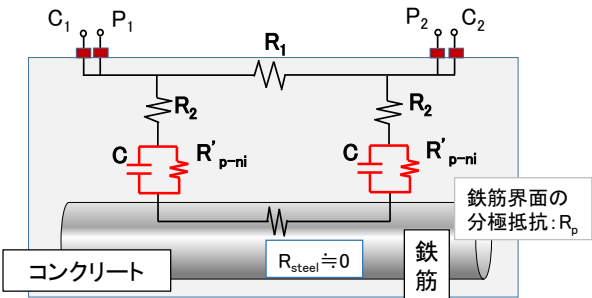


図-1 非破壊分極抵抗法の等価回路

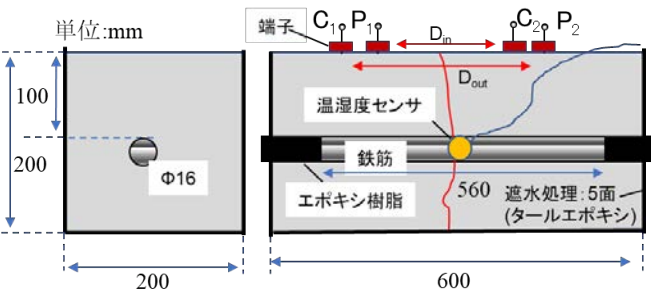


図-2 試験体と端子配置の概要図

表-1 試験体要因

試験体名	曲げひび割れ導入	ひび割れ補修	個数
N-N	なし	なし	2
C-N	あり	なし	4
C-R	あり	あり	2

キーワード 鉄筋腐食, 交流インピーダンス法, 4 端子測定, 非破壊検査, 鉄筋コンクリート

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財)電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 070-5089-2085

出し、鉄筋直上を外した $D_{out}=80\text{ mm}$, $D_{in}=40\text{ mm}$ の配置で R_s を算出し $D_{out}=240\text{ mm}$, $D_{in}=200\text{ mm}$ での計測時の値に換算した。なお、本測定条件では、 $A_{ni}=18.8(\text{cm}^2)$, $r_{2/4}=2.66$ であった。

環境条件としては、干満模擬槽に試験体を入れて、12時間に1回あたり0.5時間、3%NaClで40°Cの溶液に浸せきすることで劣化促進している。また、浸せきしていない時は40~43°C、30~100RHの環境となっている。交流インピーダンス測定は槽への設置前と2週間後に実施した。また、内部鉄筋に温湿度センサ(ISTHYT939)を巻き付け10分に1回のモニタリングを行った。

3. 実験結果と考察

図-3に各試験体に対する測定結果を示す。図中では分極抵抗から腐食電流密度への換算係数 $K=26\text{mV}$ とした場合のCEBのグレーディング²⁾に対応した判定基準も併記している。腐食促進前は、全ての試験体で $R_{p-ni}>130(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ となり健全と判定された。腐食促進2週間後では、ひび割れのない要因N-Nとひび割れを腐食促進前に補修した要因C-Rとでは健全と判定され、ひび割れ導入した要因C-Nでは $R_{p-ni}<130(\text{k}\Omega\text{cm}^2)$ であったため腐食ありと判定された。これは、C-N要因では約0.4mm幅のひび割れを通じた塩水侵入により、鉄筋表面における塩化物イオン濃度が腐食発生のしきい値を超えることに加え、多くの酸素および水分が鉄筋位置まで供給させコンクリート内部鉄筋の腐食が発生したものと推察された。一方、C-R要因のようにひび割れを補修したものはひび割れ部からの塩水侵入を防ぐことができ、腐食発生しなかったと考えられる。したがって、非破壊分極抵抗法は、臨海構造物を想定した深いかぶりの試験体に対しても適用可能であり、少なくとも腐食有無の判定に活用できることが明らかとなった。

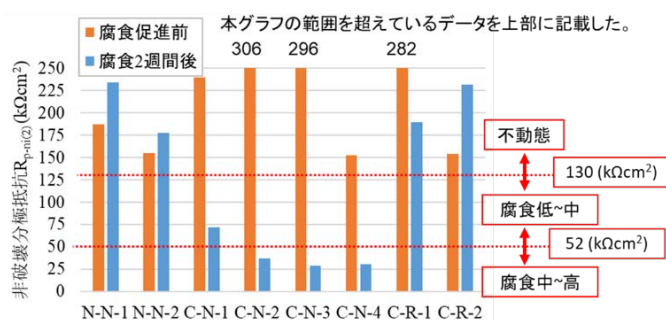


図-3 各試験体に対する腐食指標の評価結果

また、腐食発生メカニズムの考察として、環境(干満

槽内)および鉄筋位置での2日間の温湿度の計測結果を図-4に示す。3月15日の12-18時ごろに非破壊分極抵抗法の計測のために槽の蓋を空けており、環境温度が25°Cまで低下している。一方、槽内の相対湿度は30分の塩水浸せきに対応する時刻に上昇している。ここで、コンクリート中の相対湿度に着目すると、N-N要因は常時95%以上の値であるが、C-N要因は60-70%の値を示している。これはひび割れのない試験体では、鉄筋位置において常時湿潤状態になっているために、塩水および酸素が十分に侵入せず、腐食が発生しないと考えられる。その一方で、0.4mm幅の曲げひび割れが鉄筋位置まで存在すると乾燥状態となり、ひび割れを介して塩水および酸素が出入りするために、腐食したと考えられる。

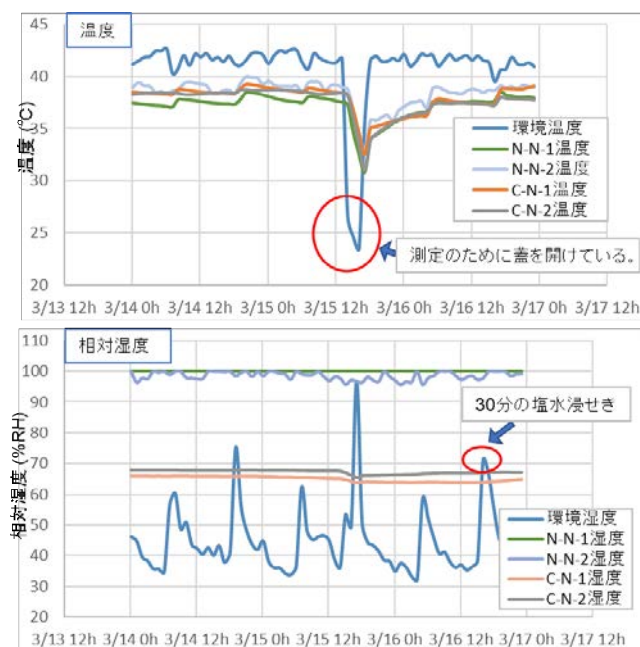


図-4 鉄筋位置での温湿度の計測結果

4. まとめと今後の展開

本研究では、かぶりの深い試験体に対して非破壊分極抵抗法が適用可能であること、および温湿度センサの活用による腐食原因の考察を示した。今後も、腐食評価と環境計測を組み合わせることによって、腐食進行を定量的に予測するための知見を取得したい。

参考文献

- 1)金光俊徳: 完全非破壊の交流インピーダンス法を用いた鉄筋コンクリート構造物の腐食診断手法の高度化, 京都大学博士論文, 2023.
- 2)CEB: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin 243, 1998.