

論文 交流インピーダンス法による海岸暴露試験体の鉄筋腐食検査

松村卓郎^{*1}・金津努^{*2}・西内達雄^{*1}

要旨：筆者らはこれまでに室内腐食実験結果を基に、交流インピーダンス法による鉄筋の腐食減量の推定方法を提案している。本研究では、松前、名古屋、沖縄県石川において暴露試験を行い、この方法の自然環境中での適用性を検討し、次の結果を得た。

1) 3年経過した名古屋（干満帯）の試験体には著しい腐食が認められ、同じく3年経過した松前（海岸大気中）の試験体には微小な腐食が観察された。2年経過した沖縄県石川（海岸大気中）の試験体には腐食は認められなかった。2) 提案した方法により、各地点の試験体の腐食減量を良好に推定でき、適用性は高いと考えられた。

キーワード：鉄筋腐食、交流インピーダンス法、非破壊検査、暴露試験

1. はじめに

海岸に建設された鉄筋コンクリート構造物では、塩分により鉄筋が腐食し構造物が劣化する事例が多く認められる。これら海岸構造物の合理的な維持管理を行うためには、鉄筋の腐食状態を的確に把握することが重要であり、鉄筋腐食の非破壊検査技術の早期確立が望まれている。

近年、交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食の非破壊検査技術についての検討が行われ、その適用性が評価されつつある。海岸に隣接した構造物の腐食評価についての報告[1]、室内促進試験による腐食評価実験についての報告[2]では、交流インピーダンス法により腐食程度（腐食面積率）の定量的評価が可能であることが示されている。また、鉄筋を電極として用いた方法についての報告[3]では、腐食速度ならびに腐食量を検知する有力な指標となることが示されている。筆者らも室内腐食促進実験結果に基づき、インピーダンスの測定値から腐食減量を推定する手法を提案し、適用性を評価してきた[4]。このように、交流インピーダンス法の有用性は次第に明らかにされつつあるが、測定器具、測定方法（電流波形、周波数など）、は様々であり、定量的な検査手法として確立されるには至っていない。また、実際の塩害環境における適用性についての検討は非常に少ないのが現状である。

本研究では、全国3地点の海岸に暴露した試験体（暴露期間2年～3年）を用いて、筆者らの提案した方法について、自然環境での適用性について検討した。

2. 交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食非破壊検査手法の概要

2. 1 測定装置および測定方法

測定装置の構成を図1に示す。測定装置は、ポテンショスタット、FRA（周波数特性分析器）、チャンネル切替器で構成され、各装置の制御およびデータの収録はパソコンで行う。コンクリート表面に設置する電極は、図2に示すように、参照電極（飽和甘こう電極）と対極（ステンレス板）を組み合わせたものである。対極は、縦15mm、横190mm、厚さ5mmのステンレス平板であり、コンクリート接触面にはスポンジを置き、これに接触液を添加する。接触液は飽和水酸

* 1 （財）電力中央研究所 構造部 主任研究員 工修（正会員）

* 2 （財）電力中央研究所 構造部 上席研究員 工修（正会員）

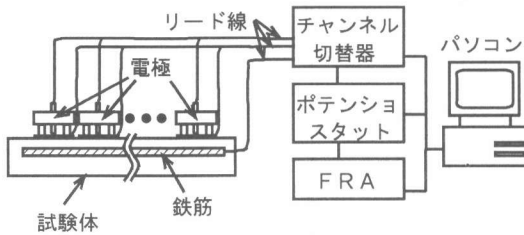


図1 交流インピーダンス測定装置の構成

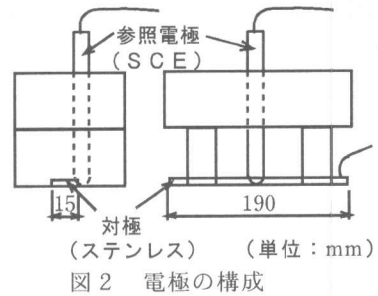


図2 電極の構成

化カルシウム水溶液を用いる。

図1に示すように、電極をコンクリート表面に設置し、鉄筋と電極との間に電流を流しインピーダンスを測定する。印加電圧は自然電位に対して $\pm 50\text{mV}$ 、周波数は $10\text{mHz} \sim 10\text{kHz}$ の範囲で変化させる。

2. 2 腐食減量の推定方法

測定されたインピーダンスは、周波数をパラメータとして複素平面上に表示(Cole-Coleプロット)すると模式的に図3のような2つの半円が連続した形状となる。この2つの半円のうち低周波数側に現れる半円の直径を分極抵抗として判読する。分極抵抗の逆数は腐食速度に比例するので、この分極抵抗の逆数の時間積分値は、腐食速度の時間積分値である腐食減量に比例する。したがって、腐食減量の推定値は次式により求められる。

$$G = \alpha S \quad (1)$$

ここに、 G :鉄筋の腐食減量の推定値 (mg/cm^2) ,
 α :実験定数(室内腐食実験の結果では $\alpha=0.0158$) ,
 S :分極抵抗の逆数の時間積分値 ($\text{sec}/\Omega \text{cm}^2$)
 である。

分極抵抗の逆数の時間積分値 S は、図4に示すように、分極抵抗の逆数の経時変化のグラフから、経時変化曲線と時間軸とに囲まれた面積を次式のように計算する。

$$\Delta S_n = (1/R_{t_n} + 1/R_{t_{n-1}})(t_n - t_{n-1})/2 \quad (2)$$

ここに、 ΔS_n :時刻 t_{n-1} から時刻 t_n までの間の分極抵抗の逆数の時間積分値 ($1/\Omega \text{cm}^2 \text{sec}$) ,
 R_{t_n} :時刻 t_n に測定された分極抵抗 (Ωcm^2) ,
 t_n : n 回目の測定時刻 (sec) である。

$$S = \sum \Delta S_n \quad (n = 1 \cdots N) \quad (3)$$

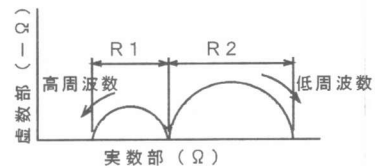


図3 インピーダンス軌跡の概念図

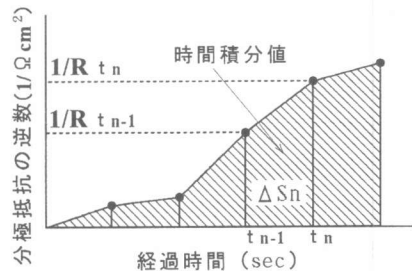


図4 分極抵抗の逆数の時間積分値算出方法の概念図

ここに、S：分極抵抗の逆数の時間積分値 ($1/\Omega \text{ cm}^2 \text{ sec}$)，N：最大測定回数である。

3. 海岸暴露実験の概要

3. 1 暴露地点

暴露地点は、図5に示すように、北海道松前町（以後松前と称する）、愛知県の中
部電力（株）西名古屋火力発電所（以後名古屋と称する）、沖縄県の沖縄電力（株）
石川火力発電所（以後沖縄と称する）の3
地点である。松前地点は、北海道の日本海
側で、冬季は海からの季節風が強く吹く地
域である。暴露位置は、海岸線からの距離
が約25m程の大気中で、海岸線（波打ち
際）までの間には障害物などは無い。名古屋
地点は、伊勢湾に面した火力発電所の護
岸の外側である。暴露位置は、潮の干満に
より試験体が一日に2回水没するいわゆる干満帯である。沖縄地点は、沖縄本島の中央付近の
太平洋側である。暴露位置は火力発電所の護岸の内側で、通常は直接波には接しない大気中で
あるが、台風などの接近時には波しぶきが掛かる。

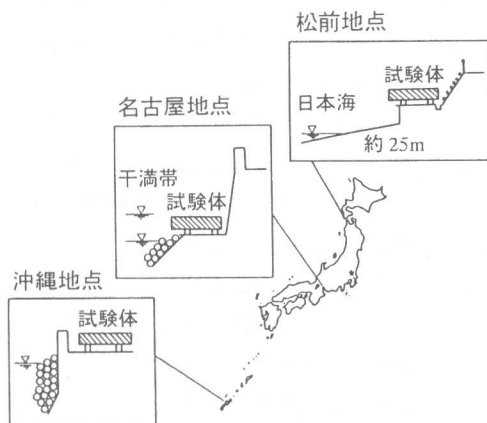


図5 暴露地点の状況

各地点の試験体は、長手方向が海岸線に直交するようにほぼ等間隔（10cm程度）に並べて配
置した。

暴露後の経過年数は、松前および名古屋の試験体が約3年、沖縄の試験体は約2年である。

3. 2 試験体

暴露実験に用いた試験体は、図6に示
すように、15cm×15cm×150cmの寸法の
はり試験体である。鉄筋は、φ19mm、長
さ140cmの丸鋼が2本配置されている。

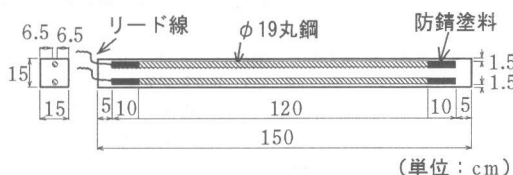


図6 試験体の形状・寸法

鉄筋腐食を生じやすくするため、鉄筋
の純かぶりは15mmと通常より小さめに設
定した。なお、名古屋36ヶ月暴露試験体
については、上側の鉄筋が所定の位置に配
置されておらず、図7に示す区間1の中央
位置でかぶり3cm、区間6の中央位置でか
ぶり6cmを有する配置となった。なお、鉄
筋は断面中央位置に配置されていた。使用
したコンクリートは、水セメント比54%、
単位セメント量 330kgである。暴露開始時
の試験体数は各地点共10体である。

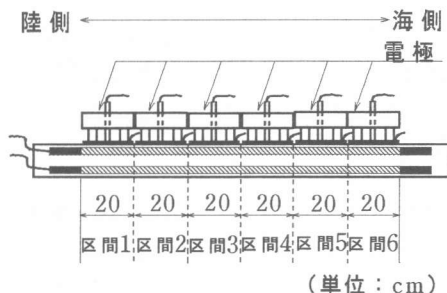


図7 電極の設置状況と区間番号

3. 3 交流インピーダンスの測定

図7に示すように、鉄筋の最小かぶり面

に、電極を6個並べて設置し、順次インピーダンスを測定した。試験体の両端からそれぞれ15cmの部分を除いた中央部分120cmの部分の長さ20cmの区間6つに区分し、それぞれの部分のコンクリート表面に電極を設置し、測定を行った。試験体には2本の鉄筋が配置されているので、それぞれの鉄筋について6点、測定点の合計は12点である。インピーダンスの測定は、現地において、約6ヶ月に1回の間隔で全ての試験体について行った。

3. 4 腐食状態の測定

約1年経過毎に、各地点から試験体を1体ずつ回収し、解体して鉄筋の腐食面積、腐食減量（腐食による重量減少量）を測定した。腐食減量については、（社）日本コンクリート工学協会編「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）」を参考に、鉄筋を60℃の10%クエン酸アンモニウム溶液に24時間以上浸漬した後、腐食生成物を除去した鉄筋の質量を測定し、腐食前の質量との差を腐食減量とした。このとき非腐食部分の黒皮が除去されたため、別に健全な鉄筋を用いて同様な方法により重量減少量を測定し補正した。各区間毎に測定された腐食面積の割合に応じて腐食減量を配分し、鉄筋の区間長さ（20cm）の表面積で除した値を、各区間の腐食減量（mg/cm²）とした。

4. 実験結果および手法の適用性評価

4. 1 試験体の劣化状況

松前、名古屋地点の試験体の劣化状況を図8および図9に示す。3年経過した名古屋（干満帯）の試験体には著しい腐食が認められ、同じく3年経過した松前（大気中）の試験体には微小な腐食が観察された。沖縄（大気中）の試験体には2年経過時点で外観上の変状および鉄筋腐食は認められなかった。上下の鉄筋共に、腐食は海側に多く発生する傾向が認められ、また、鉄筋の下面が腐食する傾向が認められた。鉄筋の海側に腐食が多く認められた理由としては、干満帯も含めて、海側の方が海水の飛沫などがかかりやすく、海側の部分により多くの塩分が浸透しているためと考えられる。下側鉄筋の腐食傾向が大きい理由については不明である。

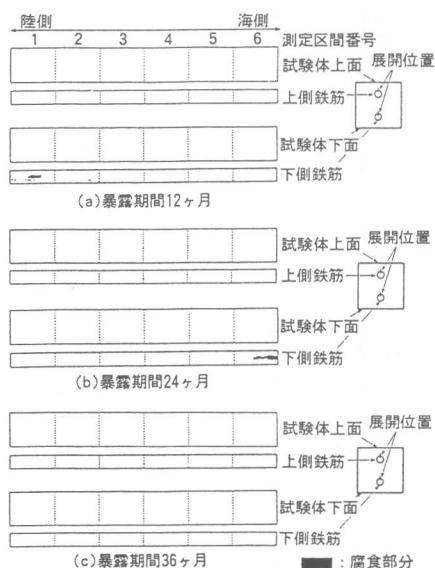


図8 松前地点試験体の劣化状況

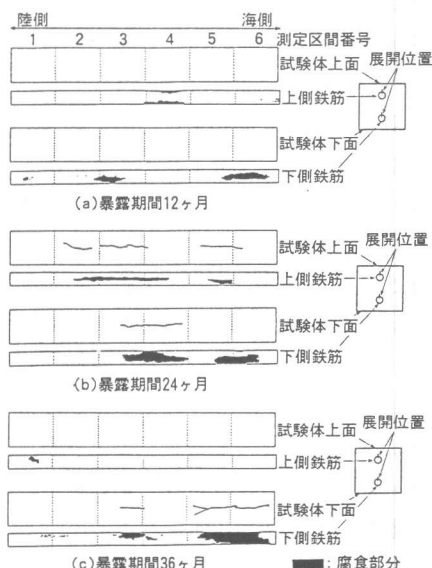


図9 名古屋地点試験体の劣化状況

4. 2 交流インピーダンスの測定結果

測定されたインピーダンスのCole-Coleプロットの例を図10～図11に示す。室内実験で得られた結果と同様に、概ね半円が2つ連続した形状の軌跡が得られた。名古屋の試験体の低周波数側の半円の直径は、暴露期間6ヶ月以上では、初期に比べて小さく、鉄筋腐食が進行していることと傾向が一致する。これに対して、松前、沖縄の試験体の低周波数側の半円の直径は暴露期間が経過しても非常に大きく、鉄筋腐食の進行が非常に小さいことと良く一致している。

4. 3 非破壊検査手法の適用性

測定されたインピーダンス軌跡において、最も低周波数側に現れた半円の直径を分極抵抗として判読した。このとき、直線状の形状のものは直径が無限大の半円と考え、分極抵抗の値を無限大とした。判読した分極抵抗の値から式(2)および(3)を用いて各測定区間毎の分極抵抗の逆数の時間積分値を算出した。時間積分値と実測された鉄筋の腐食減量との関係を室内実験との結果と併せて図12に示す。分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食減量との間に強い正の相関関係が認められ、両者は概ね線形関係にあると判断できる。今回の暴露実験の両者の関係について、原点を通る直線で近似すると比例定数は $\alpha = 0.0111$ となった。

室内実験で得られた結果と比較すると、今回得られた α の値は若干小さい値であるが、暴露実験では測定間隔が6ヶ月と長期間であるため腐食速度の日的変化、年的变化が考慮されていないことを考えると、この比例定数はほぼ同じ値と見なせると考えられる。したがって、本研究で用いた交流インピーダンス法による鉄筋腐食非破

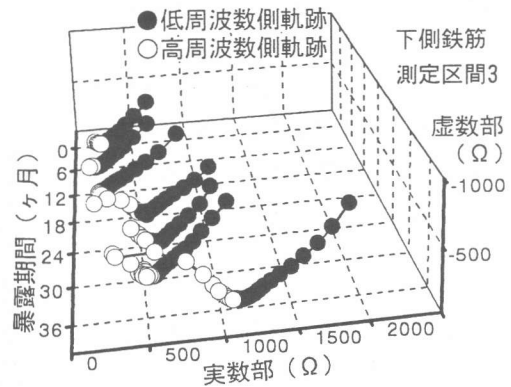


図10 松前地点の試験体のインピーダンス軌跡の例

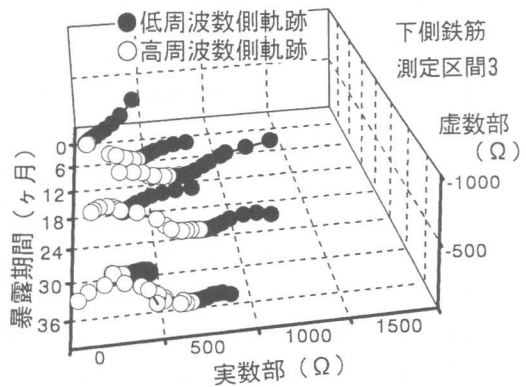


図11 名古屋地点の試験体のインピーダンス軌跡の例

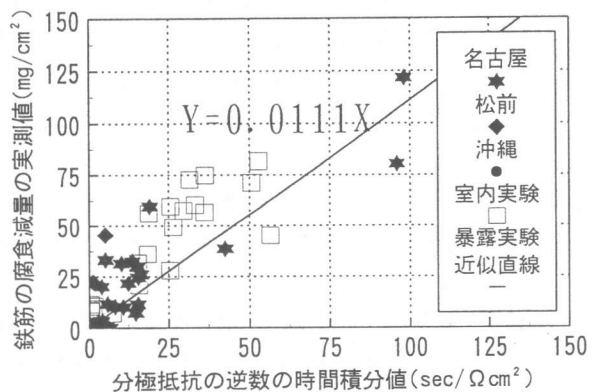


図12 測定された分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食減量の実測値の関係

壊検査手法の自然環境での適用性は高いと考えられる。なお、 $\alpha=0.0111$ を用いて式(1)より算出した腐食減量の推定値と実際の腐食減量を比較した結果、図13に示すように、概ね良好に腐食減量の分布を推定できることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、先に室内腐食促進実験結果から得られた、交流インピーダンス法を用いた鉄筋腐食減量の推定手法を、3地点の海岸に暴露した鉄筋コンクリート試験体に適用し、この方法の自然環境での適用性について検討した。主な結果は次の通りである。

- (1) 3年経過した名古屋（干満帯）の試験体には著しい腐食が認められ、同じく3年経過した松前（海岸大気中）の試験体には微小な腐食が観察された。2年経過した沖縄県石川（海岸大気中）の試験体には腐食は認められなかった。
- (2) インピーダンス軌跡の形状は、概ね室内実験で得られたものと同じであり、実際の腐食状態と比較した結果、低周波数側の半円の直径が分極抵抗を表していると考えられた。
- (3) 3地点の試験体の分極抵抗の逆数の時間積分値を求め、実際の腐食減量との関係を調べた結果、両者の間にほぼ比例関係が認められ、比例定数も室内実験とほぼ同じ値であった。この比例定数を用いて腐食減量を推定できることが確認できた。
- (4) 以上の結果、本研究で用いた交流インピーダンス法による鉄筋腐食非破壊検査手法の自然環境での適用性は高いと考えられた。

謝辞 本研究では暴露実験を進めるに当たり、北海道電力（株）、中部電力（株）、沖縄電力（株）の皆様にも暴露実験場を提供、あるいは紹介頂きました。また、現場での作業の際には、北海道電力（株）総合研究所土木グループの皆様、中部電力（株）西名古屋火力発電所総務グループの皆様、沖縄電力（株）火力部火力課の皆様、石川火力発電所の皆様に多大なるご協力を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 大城武・谷川伸・後藤信弘：コンクリート中の鉄筋の腐食評価法について，コンクリート工学年次論文報告集13-1，pp. 503-508，1991
- [2] 大城武・斉藤仁・近藤忠生：塩害を受けたRC構造物の腐食評価法について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp. 649-654，1992
- [3] 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価，コンクリート工学年次論文報告集12-1，pp. 545-550，1990
- [4] 松村卓郎・金津努・西内達雄：交流インピーダンス法による鉄筋腐食の非破壊検知，コンクリート工学年次論文報告集17-1，pp. 871-876，1995

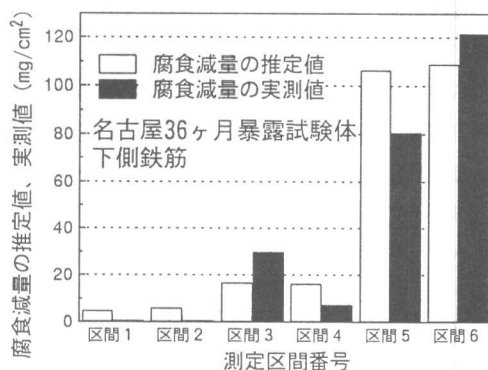


図13 腐食減量の推定値と実測値の比較例