

**投稿論文(和文)**

**PAPERS**

# 自然電位を用いた鉄筋腐食状態の 推定手法に関する基礎的研究

小山 理恵<sup>1</sup>・矢島 哲司<sup>2</sup>・魚本 健人<sup>3</sup>・星野 富夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 日本交通技術株式会社 技術開発部 (〒101 東京都千代田区西神田二丁目5-2)

<sup>2</sup>正会員 工博 芝浦工業大学助教授 (〒104 東京都港区芝浦三丁目9-14)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授 (〒104 東京都港区六本木七丁目22-1)

<sup>4</sup>正会員 東京大学生産技術研究所 (〒104 東京都港区六本木七丁目22-1)

本研究では、従来使用されている鉄筋腐食の進行状態の代表的な非破壊診断方法の中から、最も簡便で実構造物にも広く適用されている自然電位法に着目し、その結果からより多くの鉄筋腐食に関する情報を得ることを目的としている。自然電位の測定結果はコンクリート表面で示される電位の結果であり、必ずしも鉄筋表面での電位を示すものではない。よって、FEM解析を用いることにより、コンクリート表面電位から鉄筋表面電位の逆解析を行い、これまで定性的にしか判定されていない腐食領域および腐食量を定量的に評価することを試みた。

**Key Words :** *natural potential, steel surface potential, FEM analysis, specific resistance of concrete, current density*

## 1. はじめに

現在、コンクリート中の鉄筋腐食状態の非破壊的診断方法として、自然電位法、分極抵抗法に代表される電気化学的診断方法が広く適用されている<sup>1)</sup>。

しかし、一般的にこれらの方法により得られる腐食診断結果からは、得られる情報がわずかである。たとえば、自然電位法はASTM規格<sup>2)</sup>によれば、測定時における鉄筋腐食の有無の判定を行うのみに用いられており、また、分極抵抗法は測定に時間がかかるため<sup>3)</sup>、測定時における鉄筋腐食状態の推定は可能であるが、経時的測定ならびに広範囲の腐食状態の把握は困難であると考えられている。

そこで本研究では、上記の各方法の不足情報を補うため、比較的容易で長期的な測定が可能な自然電位法に着目し、鉄筋の腐食性状をより定量的に捉える新しい腐食診断手法を提案することを最終的な目的としている。

自然電位法は、多くの実構造物の調査に利用されているにもかかわらず<sup>4)</sup>、鉄筋の腐食性状と自然電位の関係は未だ不明な点が多く、自然電位の実用的研究には歯止めの掛かった状態となっている<sup>5)</sup>。その中でも、自然電位と鉄筋腐食に関する主要な研

究として、武若らは経時的な自然電位の測定結果から鉄筋腐食性状の推定を行った結果、鉄筋腐食位置の推定は十分可能であることを確認している<sup>6)</sup>。

また、橋らはコンクリートの含水率が測定電位に大いに影響することを示しており<sup>6)</sup>、さらに、田村らは、自然電位測定値は、鉄筋表面電位と鉄筋に接するコンクリートの含水率により生じた電位との和であることを示している<sup>7)</sup>。

以上を含め、既往の研究で指摘される点は、

- 1) ASTM規格のみでの腐食判定は困難であること、
  - 2) コンクリート表面での測定電位はかぶりコンクリートの影響を受け、鉄筋表面電位を表していないこと、
- の2点が考えられる。

この第2点目について、大津らは自然電位の測定結果であるコンクリート表面の電位分布から、鉄筋表面での電位を推定するための解析手法を提案している<sup>8),9),10)</sup>。一方、(社)日本コンクリート工学協会のコンクリート構造物の補修工法委員会においても、自然電位と腐食電流との関係をモデル化している<sup>11)</sup>。

そこで本論文では、自然電位の経時的な測定結果

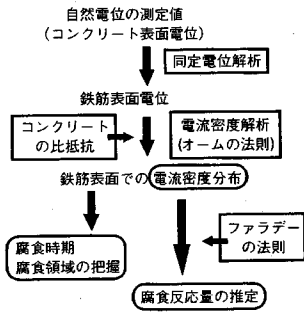


図-1 解析フローチャート

を基に、電気化学的な理論を用いて、より厳密な自然電位と鉄筋腐食の関係を明らかにし、腐食の進行状態を定量的に把握する方法を明らかにすることを目的としている。

## 2. 鉄筋腐食解析モデル

### (1)FEMによる電位解析モデル

従来、自然電位の測定結果は、表-1に示すASTM規格により規定される各照合電極の腐食評価基準と照らし合わせ、腐食状態を推定している。しかし、この測定結果に基づく診断は測定時の腐食の進行程度を示す定性的なものであり、腐食箇所の相対的な評価が行えるに過ぎない。また、自然電位法によりコンクリート表面で測定される電位は、かぶりコンクリートを介して測定された電位であり、鉄筋表面の電位を直接示したのではない。

そこで、より厳密な鉄筋電位を得るため、コンクリート表面の電位から鉄筋表面上での電位の推定を行った。

本研究による解析手順は図-1のとおりである。

コンクリートを均質な物質と考えると、その電位分布は式(1)に示すラプラス方程式を満たす解で得られる。そこで図-2のようなモデルを考え、以下の境界条件を満たす解として、コンクリート表面電位分布から鉄筋表面電位分布をFEMによる逆解析により求めることを試みた。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

まず最初にラプラス方程式に与える境界条件として、コンクリート表面での各測定点における電位を方程式に代入する。この値を基に繰り返し計算により、鉄筋表面上での電位の推定を行う。

$$v = v_c \quad (2)$$

表-1 ASTMの電位による腐食評価基準<sup>2)</sup>

飽和硫酸銅電極		飽和塩化銀電極	
電位 (mV)	腐食の確率	電位 (mV)	腐食の確率
-200mvより貴	90%以上 腐食なし	-80mvより貴	90%以上 腐食なし
-200~-350mv	不確定	-80~-230mv	不確定
-350mvより卑	90%以上 腐食あり	-230mvより卑	90%以上 腐食あり

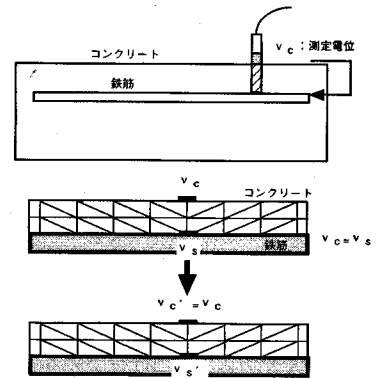


図-2 鉄筋電位解析供試体モデル

ここで、 $v_c$ はコンクリート表面上での測定電位である。

次に、電位測定面における電流流出について考える。本来、全コンクリート表面に対して、コンクリート内部の電位が外部に流出することは考えにくい。たとえば、自然電位を測定する際に照合電極がコンクリート表面に接し、鉄筋内を通過する回路が形成されるが、これより回路に流れる電流量は微々たるものであり、コンクリート表面および鉄筋表面の電位に影響を与えることはないと考えられる。そこで、コンクリート表面での境界条件は、フーリエの法則より次式で表される。

$$i = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial v}{\partial n} \quad (3)$$

ここで、 $i$ は境界上における電流密度、 $R$ はコンクリートの比抵抗、 $n$ は境界上の法線方向ベクトルである。

なお、測定面以外の面は境界条件として電流密度を0と仮定する。これは解析の便宜上、測定面以外の面の境界条件を流出電流はないと仮定し、その境界面の電位を0と想定したためである。

解析手順を簡単に説明すると、まず図-2に示すように、コンクリート表面で測定された電位 $v_c$ を鉄筋

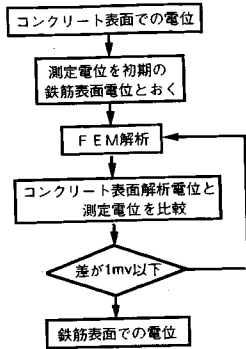


図-3 電位解析フローチャート

表面での電位 $v_s$ に置き換え、これを鉄筋表面での初期電位とする。そのときの電位分布をFEMを用いて式(1)より算出する。

次に、式(1)により計算されたモデル供試体表面での解析電位 $v_c'$ とその点での実測電位 $v_c$ との差から、真下の点にあたる鉄筋表面での初期電位 $v_s$ を補正し、さらに式(1)によりモデル供試体表面での解析電位を求め、この解析電位と実測電位の誤差が全体的に小さくなるように同定解析計算を行った。この解析の流れを図-3に示す。

この解析は、かぶりコンクリートの影響を排除するためのものである。つまり、コンクリート表面で測定された自然電位は、鉄筋表面での電位を直接示すとは限らないと考えられることから、ここでは式(1)～式(3)を用いて、コンクリートのかぶり厚さを排除し、より厳密な鉄筋表面の電位を求めることが重要である。またこの段階では、コンクリートの影響は測定された電位の値に含まれると考えられるため、コンクリートの抵抗は、次に示す電流解析において考慮する。

ただし、この解析手法により算出される鉄筋表面での電位は、自然電位法により得られる測定値が真下の鉄筋上での電位を確実に示しているとした場合の解であることから、この解析はコンクリート表面電位から鉄筋表面電位を推定するための非常に簡単かつ有効な方法であると考えられる。

## (2)電流量解析

武若らによると、自然電位の最卑値と最貴値の差が約80mVある時にマクロセル腐食が形成されるとしている<sup>5)</sup>。この場合、マクロ腐食セルのアノード(腐食)領域とカソード(非腐食)領域の境界は自然電位分布の変曲点となることが予測できる。つまり、この変曲点の電位が把握できれば腐食領域も決定できると考えられる。

そこで、この変曲点の電位を求めるため、電流量

の解析を行うことが必要となる。電位と電流量の関係はオームの法則に従うことから、前節で行った同定電位解析により求められた鉄筋表面電位を用い、既に武若ら<sup>5)</sup>や(社)日本コンクリート工学協会の補修工法委員会<sup>11)</sup>により提案されている式(4)から鉄筋上の電流量分布を推定する。

$$I_k = \int_0^l i_{kx} dx = \int_0^l \frac{v_{kx}}{R_k} dx \quad (4)$$

ここで、 $l$ は鉄筋長(cm)、 $I_k$ は任意の点 $k$ に流れ込む総電流量(A/cm)、 $i_{kx}$ は点 $k$ に各 $x$ 点から流れ込む電流密度(A/cm<sup>2</sup>)、 $v_{kx}$ は点 $k$ と各 $x$ 点との単位長さあたりの電位差(V/cm)、 $R_k$ は点 $k$ におけるコンクリートの比抵抗(k $\Omega$ ·cm)である。

このときに必要な値としてコンクリートの比抵抗がある。すなわち、実際に流れる電流量を求めるにはコンクリートの比抵抗が重要である。一般に、比抵抗は水分量等により大きく変化し<sup>6),7)</sup>、また、コンクリート健全部とひびわれ欠陥部等での差が大きいため、構造物中で一定ではない。よって、厳密な電流量分布を解析するためには、経時的でかつ広範囲の比抵抗の測定を行うことが重要であると考えられる。しかし本研究では、比抵抗の十分なデータが得られなかったため、一般的なコンクリート供試体の比抵抗のデータから、 $R=10k\Omega$ ·cm一定として解析を行った。

## (3)積算電流量の推定

さらに、次の段階として腐食量と相関性のある電流量をパラメータとして、腐食の評価を行うことを試みた。

式(4)から鉄筋表面各点における電流密度が推定され、これに腐食期間または測定間時間を乗じることにより積算電流量が算出される。なお、式(5)に示すファラデーの法則より、腐食量と積算電流量が比例関係となり、任意の時間 $t$ における腐食反応量を積算電流量から予測できるものと考えられる。

$$W_k = \int_0^t KI(t) dt \quad (5)$$

ここで、 $W_k$ は腐食反応量(g·sec<sup>-1</sup>)、腐食反応量 $K$ は電気化学当量(g·amp<sup>-1</sup>·sec<sup>-1</sup>)である。

## 3. 電位解析

### (1)解析対象供試体

前章に示す本解析の妥当性を検証するため、自然環境下におかれた供試体を対象として解析結果との

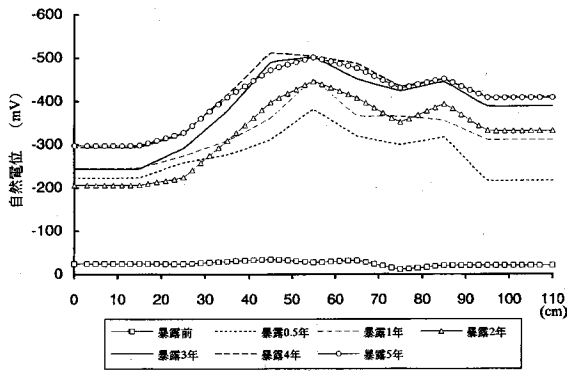


図-4 自然電位の経時的変化 (W/C=40%)

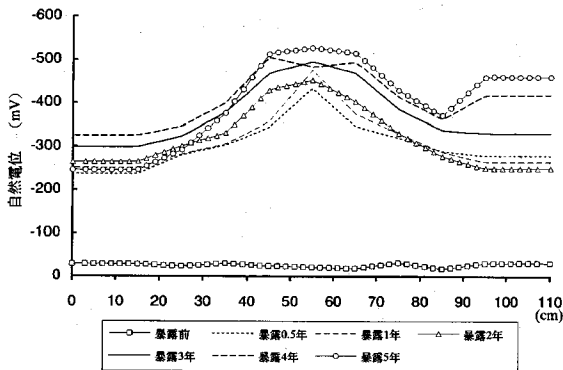


図-5 自然電位の経時的変化 (W/C=50%)

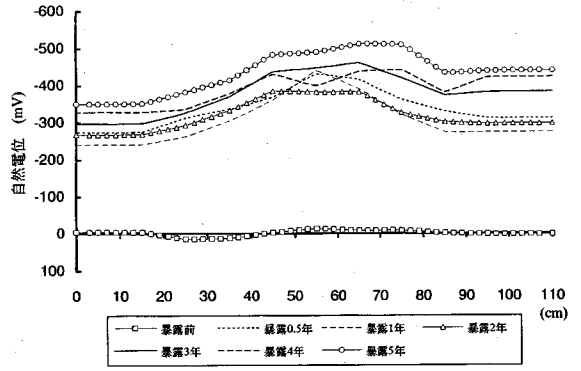


図-6 自然電位の経時的変化 (W/C=60%)

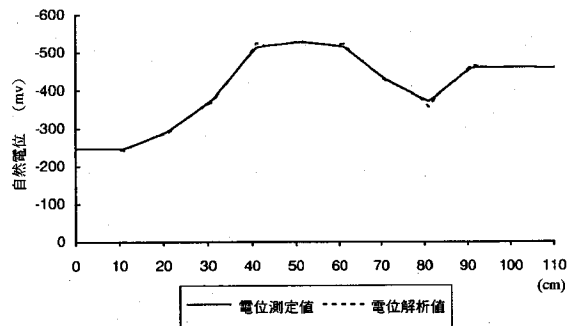


図-7 同定電位解析結果

比較を行った。解析対象とした供試体は、小林らが行った海洋環境下に5年間暴露された供試体を使用した<sup>12),13),14)</sup>。

この供試体は、材料として普通ポルトランドセメント、大井川産川砂、秩父産砕石(砂岩)を使用した、W/C=40, 50, 60%のコンクリート供試体であり、かぶり2cmの10cm×10cm×120cmの梁状供試体で、供試体中には長さ110cm、D10の異形鉄筋(高炉品)が2本平行に埋め込まれており、あらかじめ供試体の中央部にひびわれの導入がなされている<sup>12)</sup>。

この供試体は海洋飛沫環境下に5年間暴露されたものであり、その間、暴露前、暴露0.5年、1年、2年、3年、4年、5年において鉄筋の自然電位測定が続けられている<sup>14)</sup>。なお、自然電位の測定間隔は10cmで、測定には飽和塩化銀電極が照合電極として使用されている。

## (2)自然電位測定結果

これら供試体中のある1本の鉄筋に着目し、その鉄筋の自然電位の経時的変化を図-4～図-6に示す。

この自然電位の経時変化より、腐食反応が急激に促進しているのは暴露前から暴露0.5年の間であることが分かる。そして暴露0.5年以降、自然電位の

急激な低下はなく、この時期は腐食が徐々に進行していると考えられる。

ここで各鉄筋に着目すると、全体的に材齢とともに自然電位は単方向へ移行している中で、図-4のW/C=40%での鉄筋中央左部、および図-5のW/C=50%の鉄筋左端部において、暴露4年を最卑値として電位が貴側に移行していることから、暴露4年以降、これらの箇所の腐食は進行していないと考えられる。また図-6のW/C=60%では、暴露0.5年目の自然電位の全体的な低下が著しいため、腐食反応が一番進行しているものと考えられる。

なお、図-4～図-6の自然電位の測定結果のみから判断すると、全体的に腐食判定電位(-230mV vs. Ag/AgCl電極)に達した後も、全面腐食が進行していると予測される。

## (3)同定電位解析

図-4～図-6の自然電位の経時的な測定値に、かぶりコンクリートの影響を考慮するために提案した式(1)～式(3)による鉄筋表面電位の同定解析を行った。ここに例としてW/C=50%の暴露5年における自然電位測定値と鉄筋表面同定解析値との比較を図-7に示す。

この解析結果より、かぶり2cmの場合においては

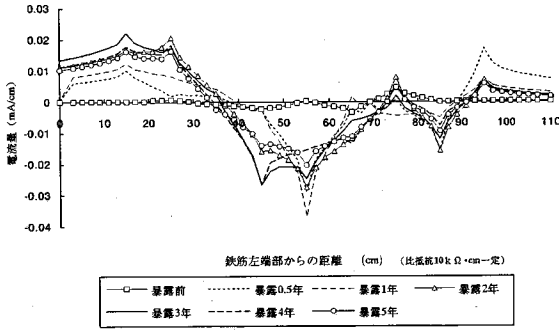


図-8 電流量分布解析結果 (W/C=40%)

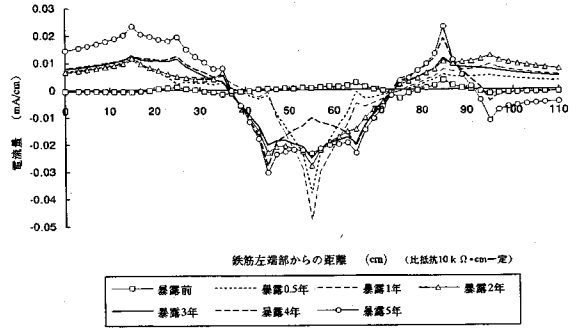


図-9 電流量分布解析結果 (W/C=50%)

測定値と解析値との間に大きな差はないことが分かる。つまり、今回のような、ひびわれの存在するかぶり2cmの場合では、コンクリート表面電位と鉄筋表面電位との差はほとんどなく、測定値を鉄筋表面での電位として扱ってもよいと考えられる。

しかしながら、かぶりが比較的大きい場合、コンクリートの表面で測定される自然電位と、その時の鉄筋表面での電位は異なると考えられる。そこで本解析により、かぶりコンクリートの影響を排除し、鉄筋表面での電位を推定することが重要であると考えられる。さらにこの解析により、次の段階での電流量解析をより厳密に行うことが可能である。

以上、本研究において、コンクリート表面の電位より鉄筋表面電位の同定解析を行ったが、かぶりが比較的小さい供試体を対象としたため、結果的に測定値と同定解析値との間に差はほとんど見られなかった。しかし、鉄筋表面上での電位を理論的に求めた結果、以後の解析は鉄筋表面上での同定解析値を用いて行うこととする。

本文では便宜上、同定解析により求められる解析値を鉄筋表面電位と呼んでいるが、実際は鉄筋表面に非常に近い場所でのコンクリートの電位を解析していることになる。これは、鉄筋の分極特性に起因している。つまり、厳密な鉄筋表面電位は、分極する以前の電位を示す。しかし、実際に照合電極で測定される自然電位は、既に分極後の電位を指すため、かぶりコンクリート中の含水率等による影響は、この分極特性に含まれ、電位解析には直接影響しない。

#### 4. 電流量解析

##### (1)電流量解析結果

##### a)比抵抗一定とした場合の電流量解析

得られた同定電位解析結果より、電流量の解析を行った。その結果を図-8～図-10に示す。

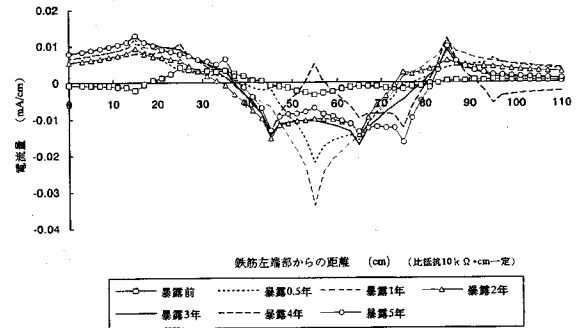


図-10 電流量分布解析結果 (W/C=60%)

この図において、マイナス側は流出電流量を示しておりアノード領域を形成している。一方、プラス側は流入電流量を示しておりカソード領域を形成している。腐食の進行はマクロセルの形成に支配されていると仮定しているため、アノードが形成されれば必ずカソードが形成される。よって、アノード電流量とカソード電流量の合計は常に0となる。

図-8～図-10に示される電流量解析結果を考察すると、非常に興味深い結果が得られた。たとえば、図-4～図-6の自然電位測定結果では、すべての鉄筋が材齢とともに電位は卑方向に移行しているにもかかわらず、図-8～図-10に示された経時的な電流密度分布では、必ずしも最卑な電位の状態を示している時期が、電流量がマイナス側に大きくなっているとは限らない。これは、解析では全材齢を通じてコンクリートの比抵抗を一定と仮定していることから、比抵抗が材齢とともに低下している、または、電位は卑方向に移行しているが電位差が小さくなり電流が全体的に流れにくくなっていると考えられることもできる。

また、図-8～図-10に示される電流量の解析結果と図-4～図-6の自然電位測定結果とを比較すると、たとえば図-4に示されるW/C=40%の自然電位分布では、暴露0.5年までに最も腐食が進行したと考え

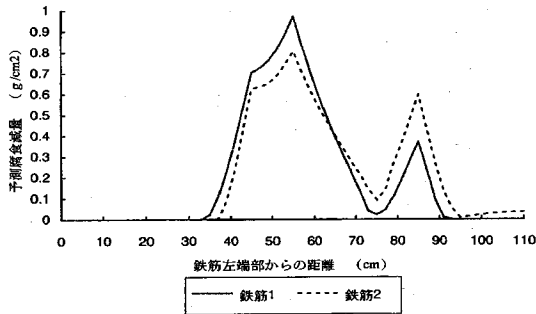


図-11 予測腐食減量 (W/C=40%)

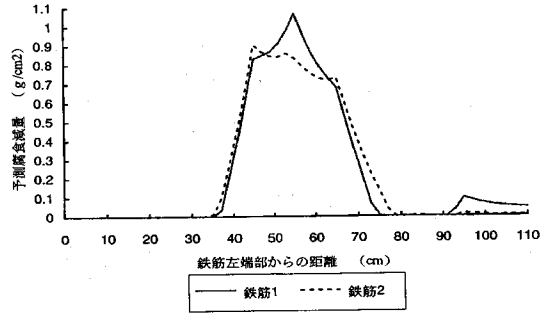


図-12 予測腐食減量 (W/C=50%)

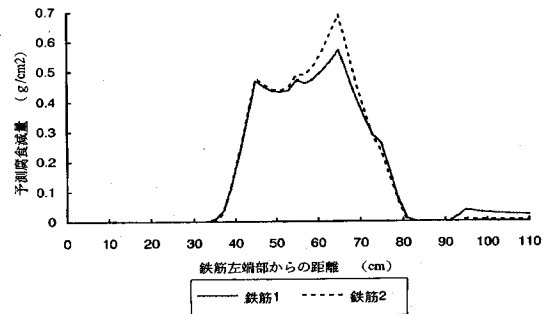


図-13 予測腐食減量 (W/C=60%)

られる。ここで図-8に示される電流量の解析結果を参照すると、暴露0.5年目の電流量分布以降、鉄筋中央部分のアノード領域が両端に広がっているのが分かる。これは最初に腐食が発生した部分が材齢とともに鉄筋軸方向両端に進行していると考えられ、この電流密度分布における変曲点（電流量0の点）が腐食促進箇所（フロント部分）となっている。また、図-5のW/C=50%の場合は、図-9より鉄筋中央部分での腐食の広がり形態が、暴露1年を境に変化しているのが分かる。この場合、暴露1年以前は、鉄筋中央部において1点の腐食が起こっているが、暴露1年以降、鉄筋中央部を中心として2点の腐食が起きている。また、鉄筋右端部は暴露3年までカソード領域にあったが、暴露4年にはアノード領域に移行している。これは、暴露4年以降、この箇所での腐食の進行はないと考えられる。さらに、図-6に示されるW/C=60%の自然電位分布からは、比較的電位のばらつきの少ない状態が推察されるが、図-10の電流密度分布では、電流量の絶対値は比較的小さいものの、アノード、カソードの腐食領域の経時変化は顕著にあらわれている。

以上の考察より、電流量分布を求めることにより、腐食の有無の診断だけでなく、腐食時期、腐食領域の把握がなされる。また、この電流量解析結果と図-4～図-6の自然電位測定結果とを比較しても、自然電位の測定結果による判定だけでは腐食領域に関する十分な情報量が得られないことは明らかである。

#### b)腐食反応量推定結果

一般に、式(5)で示されたファラデーの法則がコンクリート中で電気化学的に成立するため、経時的な電流密度の積算値は、腐食量および腐食減量と比例関係を示す。つまり、腐食反応量は比抵抗と相関性があるため、腐食反応量を定量的に求めるためには、比抵抗の測定は重要なポイントとなる。

ここでは、比抵抗を一定とし、腐食状態を示す実

測値との整合性を検討するため、腐食による鉄筋減少量をあらわす腐食減量として表した。これを、図-11～図-13に示す。

この結果は、鉄筋上2cm間隔での単位面積当たりの腐食減少量を示しており、実際に測定される腐食減量はこのグラフの積分値として表される。

図-11～図-13より、同一供試体中に埋設された2本の鉄筋は、どのW/Cの場合でもほぼ同様な腐食傾向を示しているのが分かる。W/Cごとに見ると、まず、図-11に示されるW/C=40%の場合、大きな腐食領域が2箇所に分かれて存在していると推定される。また、図-12に示されるW/C=50%の場合が最も単位面積当たりの鉄筋腐食減少量が大きくなっており、また、鉄筋中央部のほかに鉄筋右端部において微小ながらも1つの腐食領域が形成されていると考えられる。そして、図-13に示されるW/C=60%の場合は、一番腐食面積が大きい結果となり、W/Cが大きい場合に腐食が進行しやすい、という現象を表している。

ここでは、比抵抗の値を $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 一定として解析を行っているため、W/Cが大きくなるにつれアノード腐食領域にはあまり変化は見られないが、実際は腐食による鉄筋減少量は大きくなるものと推察される。そこで、この解析結果と実際の腐食状態と

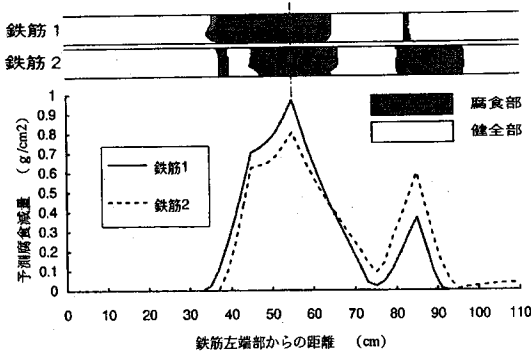


図-14 鉄筋発錆状態図 (W/C=40%)

を照合させることを試みた。

## 5. 測定値と解析値の整合性の検討

### (1) 実際の腐食状態

図-14～図-16の上図は、解析対象とした海洋暴露コンクリート梁の暴露5年における引張側の鉄筋発錆状態の実際の測定結果である。また、図-11～図-13に示す予測腐食減量を下図に対応させて示す。

各鉄筋の腐食状況は、図-14に示すW/C=40%の場合、鉄筋中央部において孔食が発生している。図-15に示すW/C=50%の場合は、細かい腐食箇所が点々としており、鉄筋中央部に比較的大きい腐食領域が見られる。図-16に示すW/C=60%の場合は、鉄筋中央部以外に右端部に腐食が認められる。

以上の発錆状況をふまえて、次節ではこの図-14～図-16に示された実際の発錆状況と、図-11～図-13で行った予測腐食減量に示される解析結果との整合性の検討を行う。

### (2) 整合性の検討

図-14のW/C=40%の場合における発錆状況図より、鉄筋中央部の孔食部分は、この腐食減量解析値を見ると、両鉄筋とも腐食箇所では比較的大きい山型の腐食減量分布を示している。また、解析結果の中央右部において、この箇所における腐食の進行は比較的大きいことが分かる。これは、発錆状況図と非常によく似た結果となっている。しかし、解析結果からは孔食の状態までの把握は困難である。

次に図-15に示すW/C=50%の場合、腐食減量解析値から鉄筋中央部の腐食が最大となっている。また、解析結果から右端部に腐食箇所が認められる。これを発錆状況図により検証すると、確かに指摘箇所において腐食が認められている。しかし、この図に示されている幅2cm程度の腐食箇所を自然電位の

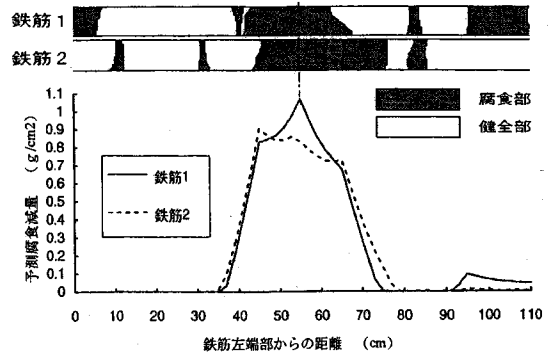


図-15 鉄筋発錆状態図 (W/C=50%)

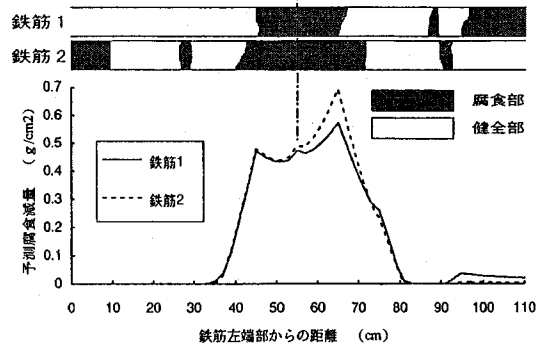


図-16 鉄筋発錆状態図 (W/C=60%)

分布から判定することはかなり難しいと思われる。

最後にW/C=60%の場合、図-16の解析結果を見ると、やはり鉄筋中央部に腐食箇所が比較的大きい範囲に広がっている。また、鉄筋右端部でわずかに腐食が認められる。これを発錆状況図と比較すると、腐食傾向は非常に近いものの、やはり細かい腐食箇所の検出は不可能であった。

以上の結果より、細かい部分の把握は困難であるが、腐食減量解析値と実際の発錆状況図では、かなり近い状態を表していることが分かる。

### (3) 測定値と解析値の定量的検討

図-14～図-16で検証されたように、腐食領域の解析結果に関しても、検出困難な箇所はあったものの、実際の発錆領域全体を含んだ形を示していると考えられる。そこで、W/Cの変化による測定値と解析値の対応を行った。

W/Cが大きくなるにつれ、総腐食減量の測定値は増大している。これは、W/Cが大きいく程、腐食は進行しやすいということを証明している。一方、総腐食減量の解析値を見ると、W/C=50%は40%より腐食減量は大きくなっているが、W/C=60%の場合は逆に腐食減量は減少している。これは図-4～図-6の自然電位測定値の経時変化から、W/C=60%の



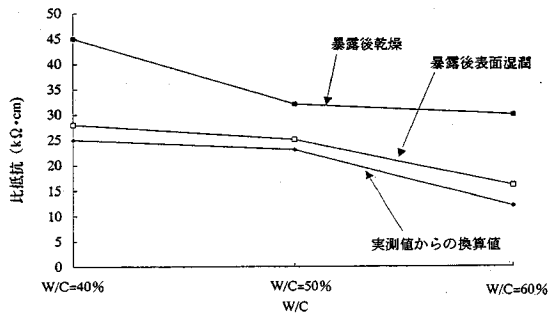


図-17 比抵抗とW/Cの関係

場合の自然電位グラフは比較的平坦であり、電位分布中に凹凸があまり見受けられないため、電流量が小さくなり、必然的に腐食反応量も小さくなったものと考えられる。また、一般にコンクリートの比抵抗はW/C=50%より大きくなると急激に小さくなると考えられている<sup>15)</sup>が、比抵抗をW/C等を考慮して変化させることにより、測定値に近い現象を再現することが可能であると考えられる。

#### (4) 暴露後における比抵抗実測値との比較

図-17は海洋暴露5年の梁状供試体を引き上げ、室内にて比抵抗の測定を行った結果である。まず、供試体を室内にて約2ヶ月乾燥させて測定した比抵抗の値を測定し、次に供試体の表面に水を含んだウェスで約24時間湿布養生させた後、比抵抗を測定した。その結果、コンクリートの含水状態により比抵抗の値はかなり広い幅をもつことが分かった。また、W/Cが大きくなるにつれ比抵抗の値は減少傾向を示している。

以上より、海洋暴露環境下におけるコンクリートの比抵抗を測定する場合、コンクリートの状態により比抵抗の値はかなり変動していると考えられるため、ある一定条件で測定された比抵抗を求めることが重要であると考えられる。そこで、本研究においては、暴露後に表面を乾燥させた後、約24時間湿布養生した状態で測定されたコンクリートの比抵抗を、海洋暴露環境下におけるコンクリートの比抵抗に代表させ、腐食減量の解析を行った。その結果を図-18に示す。

これより、暴露後表面を湿潤状態にした比抵抗を用いた腐食減量換算値は、腐食減量実測値よりも若干小さめであるが、非常に近い値を示していると考えられる。つまり、暴露後に乾燥させ表面を湿潤状態にして測定されたコンクリートの比抵抗の値は、腐食反応により減少した鉄筋量を求めるのに十分な値であると考えられる。

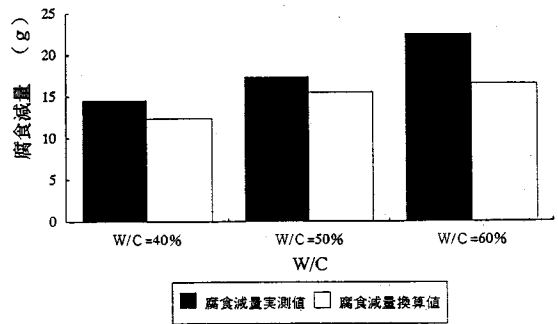


図-18 腐食減量とW/Cの関係

次に、より厳密なコンクリートの比抵抗を求めるため、図-18に示される腐食減量換算値が腐食減量実測値と同値になるような比抵抗の値を求めた。この換算値を図-17に示す。これより、腐食減量実測値から換算させた比抵抗の値は、暴露後表面を湿潤状態にした比抵抗の値とほぼ同じであり、暴露後表面を湿潤状態にした比抵抗の値を用いることにより、今まで比抵抗を $10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 一定として求めていた値が、より現実的な値として得ることができる。

以上より、暴露後表面を乾燥させた後、湿潤状態にして測定された比抵抗の値は、実際の鉄筋の腐食状態を把握するのに重要な値として捉えることができる。よって、より厳密なコンクリート中の鉄筋の腐食状態を知るためには、比抵抗の測定も経時的に行うことが重要であると考えられる。ただし、実環境下における比抵抗の値はかなりの幅でばらつくと考えられ、今後コンクリートの比抵抗の測定条件の確立が望まれる。

## 6. まとめ

本研究において、従来使用されている自然電位法により得られる結果から、より多くの情報量を得る目的として、コンクリート表面で測定された自然電位測定結果を使用して鉄筋の腐食状態を簡単に、かつ定量的に把握するという目的により、FEMによる鉄筋表面電位の同定解析から腐食状態の推定を行った。その過程により得られた結果は、以下に示すとおりである。

(1) 自然電位法は実構造物にも適用されている非破壊的な腐食診断方法の一つであるが、その測定結果による腐食状態の判定のみでは、実際の腐食状態を表すに十分とはいえない。

(2) かぶり厚が2cm程度と比較的小さい場合、鉄筋表面電位は測定電位と変わらず、測定電位を鉄筋表

面電位として扱っても問題はないと考えられる。しかし、かぶりが比較的大きい場合は、測定電位と鉄筋表面電位との差が大きく、電流密度分布に大きく影響を与えると考えられる。

(3) 本解析による電流量分布の結果を考察すると、鉄筋の腐食時期、腐食領域の定量的な把握がなされ、実際の腐食領域とよく対応していることがわかる。さらに、比抵抗を考慮することにより、腐食状態を定量的に推定することが可能である。

(4) 海洋暴露後コンクリート表面を乾燥させ、その後表面を湿潤状態にさせて測定した場合のコンクリートの比抵抗の値を解析に代入することにより、より厳密な鉄筋腐食状態を知ることが可能となることが明らかとなった。また、解析による鉄筋腐食減量の予測値を実測値と対応させた結果、非常に現実と近い結果を示すことが分かった。

従来、自然電位法では鉄筋腐食の有無のみの情報しか得られなかったが、以上のように解析を加えることにより、より多くの鉄筋腐食状態に関する情報を得ることが可能になったと考えられる。

本来、腐食電位分布を腐食進行に影響を与える電位差として取り扱うことはされておらず、本解析はあくまでも理論的な仮定を基に電気化学的な解析手法により行ったものである。しかし、未だ定性的な面はあるが、腐食領域の検出に関しては、本解析内で十分に推定可能であると考えられる。

本研究は、芝浦工業大学での修士論文の一部であり、東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室で行ったものである。

謝辞：本研究にあたり、鹿児島大学の武若耕司助教授には多大なる御協力を賜りました。また、解析に用いた実験データを利用して頂きました千葉工業大学の小林一輔教授に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) たとえば、宮川豊章、井上晋、小林和夫、藤井学：コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について、コンクリート構造物の耐久性に関するシンポジウム論文集、pp.85-90,1988.5.
- 2) ASTM C-876:Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete,1980.
- 3) たとえば、小林一輔、小林豊治、米澤敏男、出頭圭三：鉄筋腐食の診断、森北出版、1993.
- 4) たとえば、武若耕司、小林一輔：海洋環境下における鉄筋の腐食性状と自然電位分布の関係、コンクリート

工学年次論文報告集、Vol.5,pp.53-56,1983.6.

- 5) 武耕司、小林一輔：自然電位法の非破壊的鉄筋腐食検査手法への実用化について、コンクリート構造物の耐久性に関するシンポジウム論文集、pp.79-84,1988.5.
- 6) 橘吉宏、作田孝行、前田研一ほか：RC床版の自然電位法による鉄筋腐食検査と適用性に関する考察、コンクリート構造物の耐久性に関するシンポジウム論文集、pp.91-96,1988.5.
- 7) 田村博、永山勝、下澤和幸：鉄筋の腐食モニタリングに関する基礎的実験結果、鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム論文集、pp.7-14,1989.1.
- 8) 乙丸正彦、大津政康：3次元BEM解析に基づいた自然電位法による鉄筋腐食の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.1, pp.539-544, 1990.6.
- 9) 大津政康、山村浩紀：自然電位法の仮想電荷法(CSM)解析による鉄筋腐食の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.527-532, 1991.6.
- 10) 山村浩紀、大津政康：自然電位法のCSM逆解析によるコンクリート中の鉄筋腐食の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1, pp.739-744, 1993.6.
- 11) コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(2)、日本コンクリート工学協会、pp.147-151, 1994.10.
- 12) 小林一輔、星野富夫：海洋飛沫帯に3年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状、生産研究、Vol.39, No.8, pp.23-26, 1987.8.
- 13) 小林一輔、辻恒平、星野富夫：海洋飛沫帯に3年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(5)、生産研究、Vol.40, No.7, pp.35-37, 1988.7.
- 14) 小林一輔、星野富夫、辻恒平：海洋飛沫帯に5年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(3)、生産研究、1.41, No.11, pp.73-76, 1989.11.
- 15) たとえば、コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.126, 1992.10.

(1995. 6. 14 受付)

## PREDICTION OF STEEL CORROSION PORTION AND AREA BY NATURAL POTENTIAL MEASUREMENT

Rie KOYAMA, Tetsuji YAJIMA, Taketo UOMOTO and Tomio HOSHINO

Natural potential measurement is one of the most simple method to evaluate corrosion of reinforcing steel bars in concrete. But the relation between natural potential and corrosion of reinforcing steel bars is not clarified, yet.

This paper trys to estimate corroded area and amount of corrosion quantitatively by using natural potentials at the surface of steel bars obtained from FEM analysis using natural potentials at the surface of concrete.