

# 論文 自然電位を用いた鉄筋腐食状態の予測方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>

要旨：コンクリート表面における自然電位の測定結果から、鉄筋表面における電位をラプラス方程式を満足する解としてFEMにより同定解析を行った。それにより得られた鉄筋表面電位とコンクリートの比抵抗から、オームの法則を用いて鉄筋表面に流れる電流密度を求めることを試みた。その電流密度の経時的な変化から、腐食領域の広がりや腐食量を定量的に予測することが可能になると考えられる。また、実際の腐食状態との整合性を検討するために、既往の研究結果を基に実際の腐食状態と照らし合わせることにより解析の妥当性を考える。

キーワード：自然電位、電流密度、FEM同定解析、鉄筋腐食、腐食量

## 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食状態を非破壊的に評価する方法として、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使用されている。しかし、これらの診断方法はそれぞれ欠点を伴い、たとえば自然電位法は、測定された自然電位がかぶりコンクリートの影響を受けるため、必ずしも鉄筋表面での電位を示しているとは限らない。また、この自然電位を測定した結果に基づく診断から、鉄筋腐食の有無を大まかに診断することは可能であるが、それは測定時の鉄筋腐食の進行程度を示す非常に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。一方、分極抵抗法の欠点は、測定時における腐食電流量を示すことはできるが、測定に時間がかかるため、経時的な変化があまり測定されていないという点である。

そこで本研究では、前述の電気化学的診断方法の各々の欠点を補うような腐食診断方法を検討し、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経時的な腐食量を定量的に評価することを目的とした。

既に大津らが、BEM、CSMによる電食試験での鉄筋表面電位の予測解析手法を提案している[1]、[2]、[3]が、本研究では、自然環境下における腐食の進行状態を把握することを目的として、実構造物にも広く適用されている自然電位法の結果を用いて、その経時的变化を測定した既往の自然電位測定結果から鉄筋表面における電位を同定解析した。さらに、得られた電位をオームの法則に従い電流密度に換算することで、経時的な腐食領域の広がりを定量的に予測し、また、実際の腐食状態との整合性を検討することにより解析の妥当性を検証する。

## 2. FEMによる電位解析モデルの概要

コンクリートが均質であるならば、電位分布はラプラス方程式を満たす解で得られる。そこで図-1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

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 (正会員)

\*3 東京大学教授 生産技術研究所、工博 (正会員)

鉄筋表面電位をFEMにより同定解析を行うことを試みた。

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

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

$$i = -1/R \cdot \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $v_c$ は測定電位、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。

まず、コンクリート表面で測定された電位 $v_c$ を鉄筋表面での電位 $v_s$ に置き換える。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。なお、モデル供試体の4面は境界条件として、式(3)に示す通り電流密度iを0と仮定する。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 $v_c$ との差を用いて、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-2に示す。

この解析手法により算出される鉄筋表面での電位は、モデル供試体表面での実測電位から求められる無限個の解の一つであるが、自然電位法により得られる値が真下の鉄筋上の電位を確実に示しているとするならば、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でかつ有効な方法であると思われる。

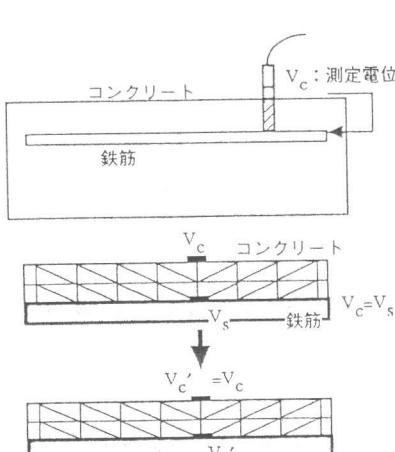


図-1 解析供試体モデル

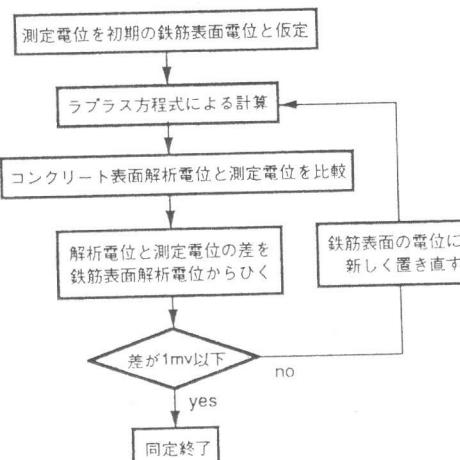


図-2 解析フローチャート

### 3. 電流密度

#### 3. 1 電流密度解析

自然電位法では、各照合電極による腐食電位の範囲がASTM規格により規定されているが、これは腐食の有無の可能性を推定するものであり、大まかな腐食領域は推定されるものの、腐食の進行を支配するマクロセルの形成を定量的に把握することは困難である。また、鉄筋の腐食量は積算電流量に比例するため、自然電位の分布状態から電流密度の分布を求めることが重要であると考えられる。そこで、前記の同定解析により求められた鉄筋表面電位を用いて、既に武若ら[4]やJCI補修工法委員会[5]により提案されている式(4)から鉄筋上の電流密度分布を推定する。

$$I_k = \int_0^1 i_{kx} dx = \int_0^1 v_{kx}/R_{kx} dx \quad (4)$$

ここで、 $l$ は鉄筋長(cm)、 $I_k$ は任意の点  $k$  に流れ込む総電流密度(A/cm<sup>2</sup>)、 $i_{kx}$ 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)、 $R_{kx}$ は点  $k$  におけるコンクリートの比抵抗(kΩ・cm)である。

なお、このときに重要な値としてコンクリートの比抵抗がある。電位解析は抵抗の影響を受けないため、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を自然電位と同様に経時に測定する必要がある。比抵抗は水セメント比や時間と明確な関連性がなく、また、コンクリート健全部とひびわれ欠陥部との差が大きいため、実際には構造物中で一定とはならない。よって、厳密な電流密度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、解析対象とした供試体が海洋暴露環境下に設置されていたこともあり比抵抗のは5~40kΩ・cmの範囲に分布していたため、まずは電位同定計算の初期段階として比抵抗を一定として解析を行った。解析に使用した比抵抗の値は、一般的なコンクリート供試体の比抵抗のデータから、 $R = 10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ とした。

### 3. 2 腐食量および腐食減量の推定

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。式(5)に示すファラデーの法則は、腐食量 $W_k$ と積算電流量が比例関係を示すことを表しており、積算電流量が求められれば任意の時間  $t$  の鉄筋腐食量が求められることになる。

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

ここで、 $K$  は電気化学当量(g・amp<sup>-1</sup>・sec<sup>-1</sup>)である。

## 4. 解析結果と測定結果の比較

### 4. 1 解析対象供試体概要

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と比較を行った。解析対象とした供試体は、小林ら [6]、[7]、[8] が行った海洋環境下に5年間暴露されたW/C=50%、かぶり2cmの10cm×10cm×120cmの梁状供試体で、供試体寸法および配合は表-1、図-3のとおりである。

供試体中には長さ110cm、D10mmの異形鉄筋（高炉品）をかぶり2cmで2本埋め込み、あらかじめ供試体中央部にひびわれを導入している。本解析ではその内の一一本の鉄筋に着目し、測定された自然電位の経時的变化から、鉄筋上で腐食の発生および腐食の進行状態の推定と実際の腐食状態との比較を行った。

表-1 供試体配合

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ (cm)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
50	45	196	392	807	1,013	8

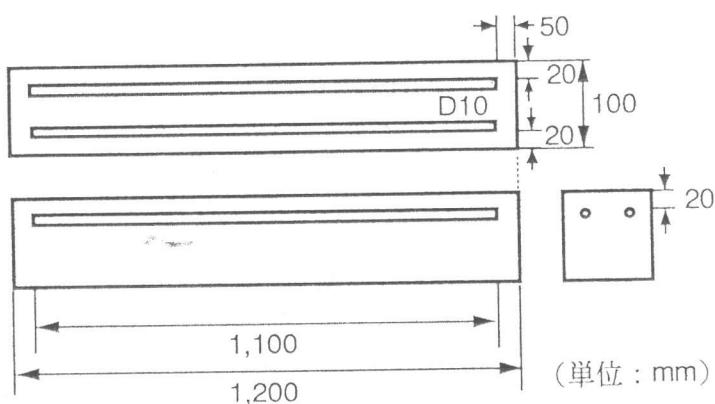


図-3 解析供試体寸法

#### 4. 2 自然電位の経時的変化

図-4は暴露前、暴露0.5年、1年、2年、3年、4年、5年におけるコンクリート表面での測定電位(vs Ag/AgCl電極)を経時的に示したものである。材齢の経過に伴い自然電位は卑の方向に移行しており、ASTM規格によれば暴露0.5年において鉄筋全体が腐食の判定基準となる電位(vs Ag/AgCl電極では-230mV)に達している。つまり、この自然電位の測定結果から判断すると、暴露0.5年で全面腐食が進行していると考えられる。そこで次に2.で紹介したように、鉄筋表面での電位分布の同定計算を行い、その値で腐食の判定を行うことを試みた。

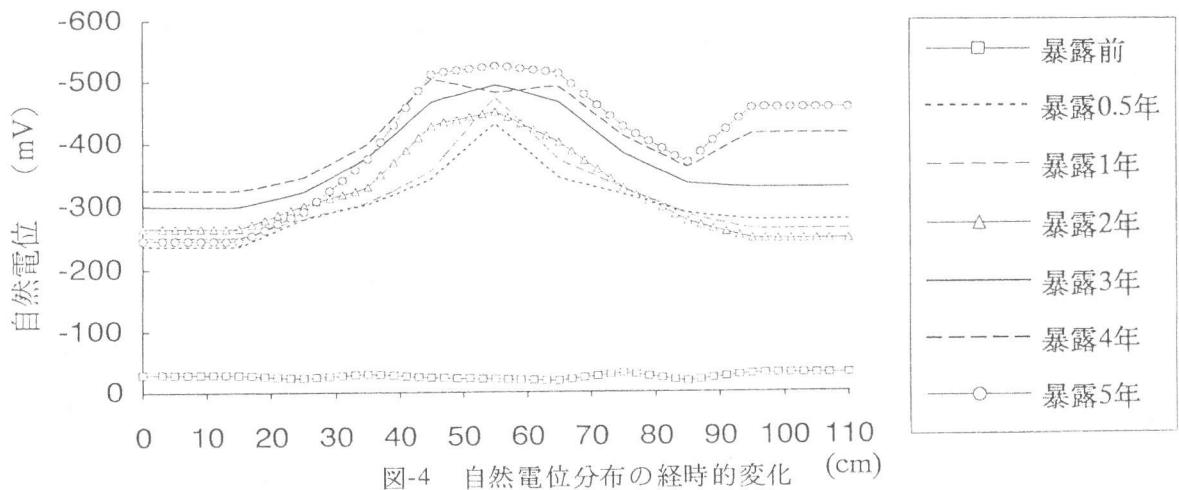


図-4 自然電位分布の経時的変化 (cm)

#### 4. 3 鉄筋表面電位の同定解析結果

ここに暴露5年におけるコンクリート表面電位分布を例として、鉄筋表面電位の同定解析結果を図-5に示す。これより、かぶり2cm程度では電位の差にかぶりの影響はあまりなく、実測値を用いても大差がないと考えられる。

しかし、かぶりが大きくなればコンクリート表面での電位と鉄筋表面での電位の差がより顕著に表れると考えられるため、鉄筋表面での電位を求めておく必要があると考えられる。

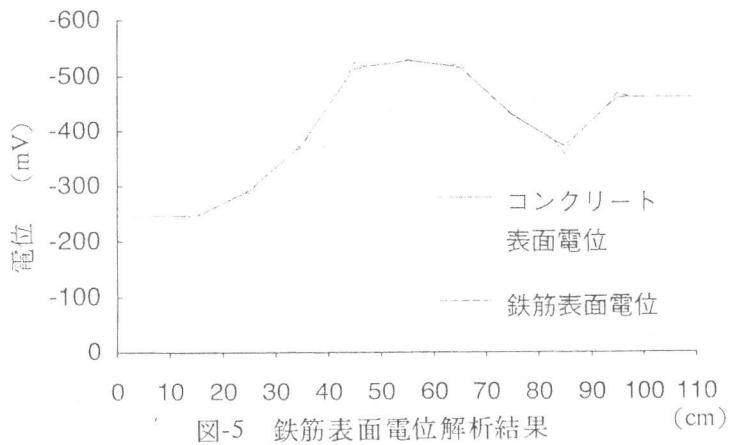
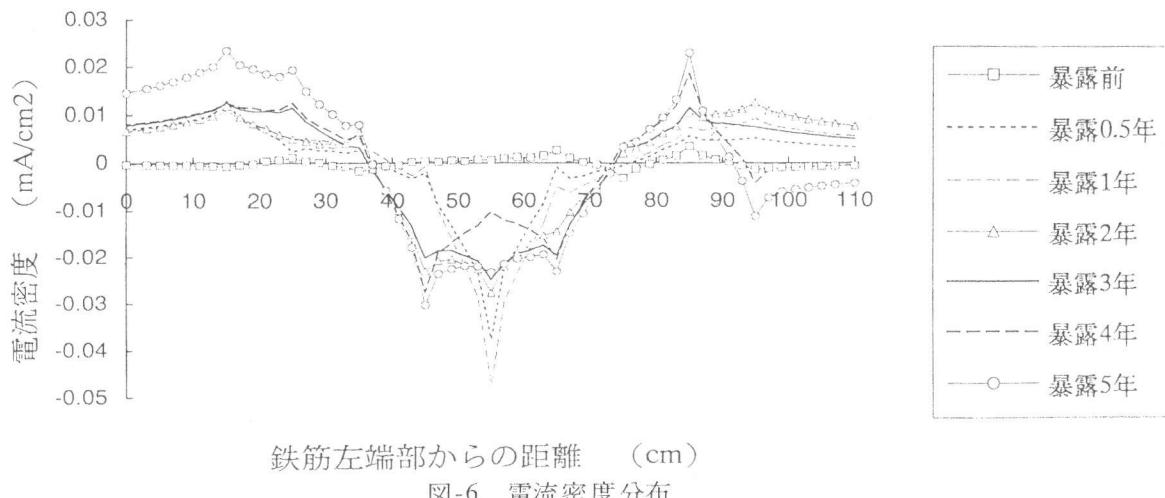


図-5 鉄筋表面電位解析結果 (cm)

#### 4. 4 電流密度の経時的変化

図-4に示される値を例として、各材齢による電流密度分布を解析した結果を図-6に示す。このグラフでは、電流の流出する箇所が負で示され、電流の流入する箇所が正で示されている。つまり負側がアノードであり、正側がカソードとなる。腐食の進行はマクロセルの形成に支配されて

いるため、この供試体は暴露期間中マクロセル腐食が進行していたものと考えられる。また、この解析結果と図-4とを比較してみても、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。



鉄筋左端部からの距離 (cm)

図-6 電流密度分布

#### 4. 5 腐食減量の推定、測定値との比較および考察

ファラデーの法則により電流密度分布から腐食減量および腐食量を推定することができる。図-7は、比抵抗を $10\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 一定として推定された、腐食減量分布および実際の腐食領域を比較したものである。

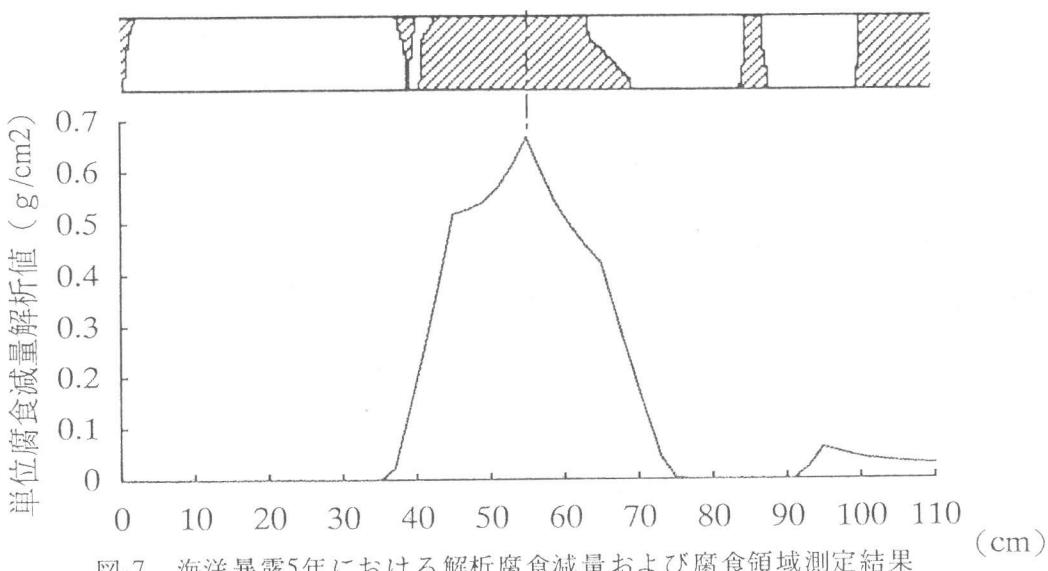


図-7 海洋暴露5年における解析腐食減量および腐食領域測定結果

図-7に示すように、解析による腐食領域は実測値に近い状態を表していることが分かる。次に、定量的に腐食状態を示すため腐食減量の換算を行った。単位面積当たりの腐食減量を積分すると総腐食減量となり、これを実測値と比較した結果、実測値が約15.6g、解析値が約26.4gという結果が得られた。この差は比抵抗を一定としたため、腐食進行箇所に対する比抵抗の影響が考慮されていないことが原因と考えられる。また、腐食面積率は実測値が約32.2%、解析値が約54.5%であり、実際の腐食反応は解析値に比べると狭い範囲で進行しているが、これは実際の腐食箇所(アノード部)で比抵抗がかなり小さいため電流が流出しやすくなり、カソード部が大きくなつた

めであると考えられる。今回の解析では比抵抗の比抵抗の値を $10k\Omega \cdot cm$ 一定としたため、厳密な解析を行うことはできなかったが、今まで図-4の自然電位分布しか得られなかった自然電位法の測定結果を、図-7に示すように腐食減量や腐食面積率をより定量的に求めることが可能であると考えられる。今後、さらに多くの供試体のデータを解析し、自然電位を用いた定量的な腐食量推定解析の妥当性が認められるよう、モデルの改良を行うつもりである。

## 5. まとめ

本研究において、コンクリート表面で測定された自然電位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減量の推定を行った。その結果は、以下に示すとおりである。

(1) FEM同定解析による結果、コンクリート表面電位から鉄筋表面電位の予測は、かぶりが2cm程度と比較的小さい場合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。

(2) 本解析による電流密度分布の結果を考察すると、解析により求められた腐食減量と実測値は必ずしも一致しないものの、推定された腐食領域は実際の腐食領域とよく対応していることが分かる。よって、この分布によりマクロセル腐食の領域を特定することが可能となり、精度よく比抵抗を求めることができれば、腐食減量の推定も可能であると考えられる。

**謝辞**：本研究の実施にあたり、鹿児島大学の武若耕司助教授には多大なる御協力、御鞭撻のほどを賜りました。また、解析に用いた実験データを利用させて頂きました千葉工業大学の小林一輔教授らに深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 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.539-554、1990.6
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 武若耕司、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診断に関するシンポジウム論文集、pp.79-84、1988.5
- 5) コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(2)、pp.147-151、1988.5
- 6) 小林一輔、星野富夫：海洋飛沫帶に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
- 7) 小林一輔、辻恒平、星野富夫：海洋飛沫帶に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
- 8) 小林一輔、星野富夫、辻恒平：海洋飛沫帶に5年間暴露した鉄筋コンクリート梁の性状(3)、生産研究、Vol.41、No.11、pp.73-76、1989.11