

コンクリート中の鉄筋の腐食速度解析に関する基礎検討

Basic Study on Analysis of Corrosion Speed of Rebar in Concrete

親 本 俊 憲 横 関 康 祐
平 石 剛 紀 宮 里 心 一¹⁾

要 約

ひび割れなどのコンクリートの欠陥は、鉄筋の腐食機構や腐食速度に大きな影響を与える。本研究では、ひび割れのあ
るコンクリート中の鉄筋の腐食速度を解析するためのモデルを提案し、数値シミュレーションを行った。また、ひび割れ
を模擬したスリットをモルタル試験体に入れて、モルタルに分割鉄筋を埋め込み、マクロセル電流とミクロセル電流を測
定してシミュレーション結果との比較を行った。腐食電流は分極曲線を使って計算したが、計算値が実測値より過大と
なったケースについては、酸素の拡散律速モデルを想定して電流を計算し、実測に近い値を得ることができた。次にス
リット幅別の分極曲線を比較したところ、スリット幅が小さいほど腐食速度が小さいことを確認した。また、スリットに
近い鉄筋ほど腐食速度が大きいことも確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 鉄筋腐食のメカニズム
- III. 解析方法
- IV. 解析と実験の比較
- V. まとめ

I. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を決定する主要な要因の一つに鉄筋腐食がある。鉄筋は、これを保護するコンクリートが健全であれば、コンクリート中の高アルカリ環境下で不動態化しているために腐食は進みにくい。しかし、コンクリートにひび割れなどの欠陥が生じた場合、炭酸ガスや塩化物イオン、酸素や水分など腐食を促進する物質がコンクリート内部に浸透しやすくなり、腐食が局部的、かつ急速に進むマクロセル腐食の危険が増すことが知られている。

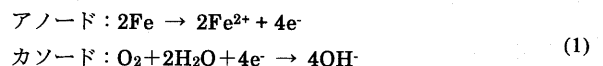
このように、ひび割れなどコンクリートの欠陥が原因でマクロセル腐食が進むことは以前から認識されており、室内実験、暴露実験などもいくつか行われているが、腐食速度の解析まで行った例は少ない。また、ほとんどの実験は試験体に幅の制御が難しい曲げひび割れを入れて実験を行っており、ひび割れ幅と腐食速度の関係を詳細に把握することは困難であった。

本研究の最終目標は、コンクリートに生じるひび割れなどの欠陥や中性化、塩害などを考慮しながら、実構造物中の鉄筋腐食速度を解析し、RC構造物の耐久性を評価・予測することにある。その第一段階として、本報では、ひび割れを模擬したスリットを入れたモルタル試験体を対象に、マクロセル・ミクロセルによる腐食速度を解析する手法を提案し、実験結果と比較することで手法の妥当性や

改善点を検討した。

II. 鉄筋腐食のメカニズム

活性態にある鉄筋は水と溶存酸素の作用によって腐食を引き起こす。このとき鉄筋表面では、式(1)に示すように鉄が電子を失いイオン化するアノード反応と、酸素と水が電子を受け取り水酸化物イオンが生じるカソード反応が同時に進行する。



腐食が進む場合、アノード部とカソード部が電気回路を形成して両者の間に腐食電流が流れる。腐食電流は腐食が進む速さを表わしており、腐食量 W (g) は、電気化学当量 k (g/C)、腐食電流量 i (A)、時間 t (s) を使って、式(2)に示すFaraday則から求めることができる。

$$W = kit \quad (2)$$

コンクリートにひび割れが生じている場合は、Fig.1に示すように、ひび割れから酸素や水分、二酸化炭素や塩化物イオンなどの腐

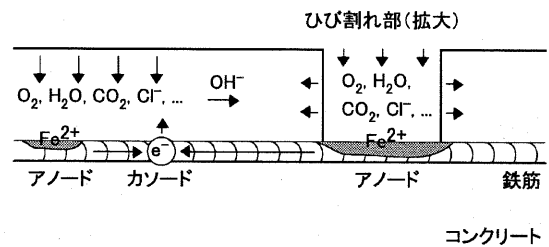


Fig.1 鉄筋腐食のメカニズム
(Corrosion Mechanism of Rebar)

1) 金沢工業大学

キーワード：鉄筋腐食，マクロセル，ミクロセル，
分極曲線，酸素拡散，分割鉄筋

食を促進する原因となる物質の侵入が盛んになる。また、鉄筋周辺の環境が不均一となって電気化学的な性質が変化することで、マクロセルと呼ばれる腐食電池が形成され、局部的に急激な腐食を生じやすい。

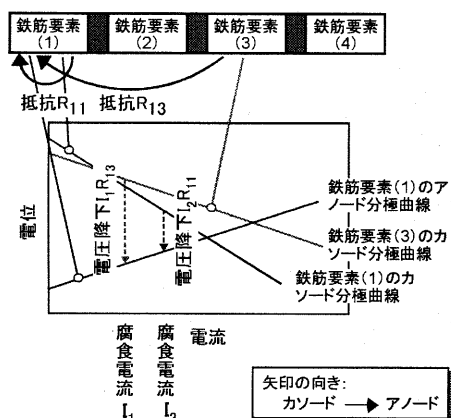


Fig.2 分極曲線を用いた腐食電流の計算イメージ
(Calculation Image of Corrosion Current based on the Polarization Curve)

Fig.2に示すように、アノードとカソードの電位を変化させたときの電流の変化を表す分極曲線と、アノード・カソード間のコンクリート抵抗などによる電圧降下を組み合わせることで、腐食電流量を求めることができる。

III. 解析方法

1. マクロセル・ミクロセル腐食の考え方

コンクリートのひび割れなどの欠陥が腐食速度に与える影響を把握するために、解析や実験にあたっては、マクロセル腐食とミクロセル腐食に分けて腐食を考える。

実験によるマクロセル腐食速度・ミクロセル腐食速度の測定は、宮里らの分割鉄筋を用いた方法を使って行った¹⁾。分割鉄筋は所定の長さの鉄筋断片をエポキシ樹脂などの絶縁樹脂で接合したものである(以後、各断片を鉄筋要素と呼ぶ)。これらの鉄筋要素の端部間にはリード線で結線されているため、電気的には一本の鉄筋と見なす

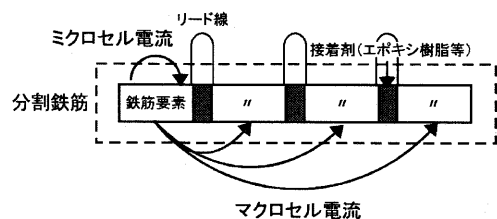


Fig.3 マクロセル・ミクロセルの考え方
(Basic Idea of Macro-cell and Micro-cell)

ことができる。

解析・実験とも、Fig.3のようにアノード・カソードが単一の鉄筋要素内に存在する場合をミクロセル腐食、異なる鉄筋要素内に存在する場合をマクロセル腐食と見なす。

2. 腐食速度の求め方

(1) 分極曲線を用いた腐食速度

Fig.2に示すように、アノードとカソードに相当する鉄筋要素の分極曲線、およびアノード・カソード間のコンクリート抵抗などを組み合わせることで、当該アノード・カソード間を流れる腐食電流量が得られる。

しかし、後述の実験では、コンクリート抵抗の測定値を用いて解析から求めた腐食電流量が、一部の試験体で実測値の数倍～10倍ほど大きくなったため、分極曲線のほか、酸素の供給量を考慮する必要があると判断した。

そこで、限界電流(鉄筋への酸素の供給速度から得られる腐食電流)を求め、分極曲線から求めた腐食電流量と限界電流量を比べて実際の腐食電流に近いと考えられる小さい値を最終的な腐食電流量とみなした。

(2) 酸素の供給速度を用いた腐食速度

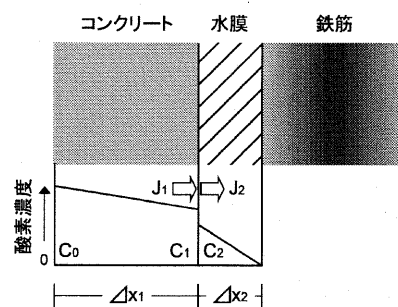


Fig.4 鉄筋近傍の酸素の流束
(Flux of Oxygen near Surface of Rebar)

酸素拡散支配における腐食速度は、鉄筋表面への酸素の供給速度(流束)によって計算できる。詳細な計算方法の説明は文献2)に譲り、ここでは概略のみを述べる。

コンクリート中の鉄筋表面近傍を拡大したものをFig.4に示す。

コンクリート表面の酸素濃度を C_0 (mol/m³)、コンクリートと水膜の境界を考えた場合のコンクリート側の酸素濃度を C_1 (mol/m³)、水膜側の酸素濃度を C_2 (mol/m³)、かぶりコンクリートの厚さを Δx_1 (m)、水膜の厚さを Δx_2 (m)とおく。また、コンクリートと水膜の境界前後での酸素の流束をそれぞれ J_1 (mol/m²s)、 J_2 (mol/m²s)とする。鉄筋表面のカソード反応で全ての酸素が消費されると仮定し、鉄筋要素の表面積を S (m²)、Faraday定数を F (C/mol)とすると、限界電流 I_l^c (A)は式(3)で表される。

$$I_l^c = 4 \cdot J_2 \cdot S \cdot F \quad (3)$$

$J_1 = J_2$ の関係を用いて J_2 を求めると、式(4)となる。

$$\begin{aligned} J_2 &= D_2 C_2 / \Delta x_2 \\ C_2 &= \frac{A}{Ak/RT + 1} C_0 \\ A &= \frac{D_1 \cdot \Delta x_2}{\Delta x_1 \cdot D_2} \end{aligned} \quad (4)$$

なお、 D_1 はコンクリート中の酸素の拡散係数 (m²/s)、 D_2 は水膜中の酸素の拡散係数 (m²/s)、 R は気体定数 (8.314J/Kmol)、 T は絶対温度 (K)、 k はヘンリー定数 (Pa)である。

一つの鉄筋要素をカソードと考え、アノードに相当する全ての鉄筋要素間に流れる電流の合計が限界電流に等しくなると考え、限界

電流をアノードとなる鉄筋要素に分配する。電流の分配は、Fig.5に示す等価電気回路を想定して、アノード・カソード間の抵抗に応じて式(5)にもとづいて行う。

$$I_{ij} = I_i^c \times \frac{1/R_{ij}}{\sum 1/R_{ik}} \quad (k=1..n) \quad (5)$$

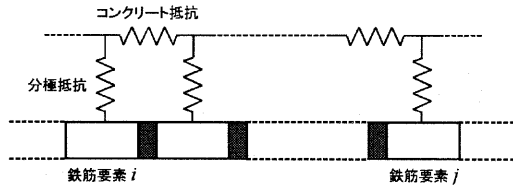


Fig.5 等価電気回路の例
(Example of Equivalent Circuit)

なお、 I_{ij} はカソードに相当する鉄筋要素 i とアノードに相当する鉄筋要素 j 間に流れる電流を、 R_{ij} は i と j 間の分極抵抗とコンクリート抵抗の合計を、 n は鉄筋要素の数を表わす。

3. 解析フロー

任意の鉄筋要素 (Fig.3に示すように、マクロセルの場合は異なる二つの鉄筋要素、ミクロセルの場合は一つの鉄筋要素) の分極曲線から求めた電流量と、限界電流を分配した結果得られた電流量を比較し、小さい値を任意の鉄筋要素間に流れる電流量と見なす。電流の流入・流出を考えながらこの作業をそれぞれの鉄筋要素ごとに行い、最終的に鉄筋要素ごとの腐食電流量を決定する。

本研究で想定した解析フローをFig.6に示す。このうち、本報で考慮したパラメータは網掛けで示されたものである。

IV. 解析と実験の比較

1. 実験方法

(1) 試験体の作製

マクロセルおよびミクロセルによる腐食速度解析の妥当性を検証

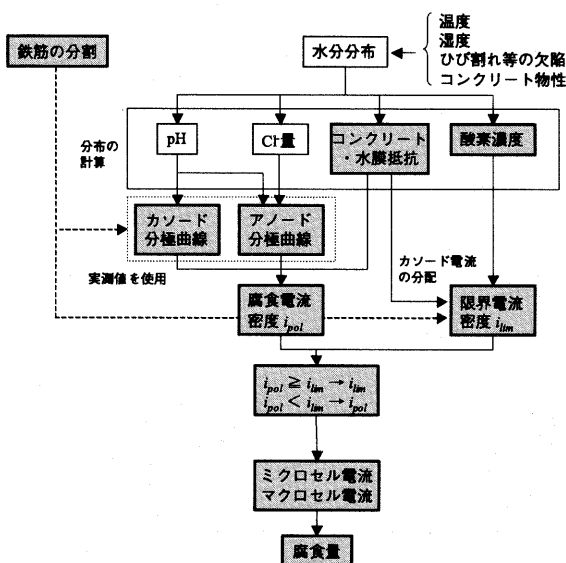


Fig.6 解析フロー
(Flow of Calculation)

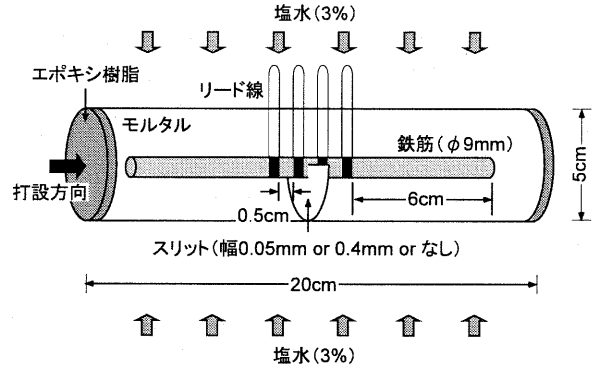


Fig.7 試験体の概略
(Outline of Test Piece)

Table 1 使用材料
(Used Materials)

セメント	普通ポルトランド, 密度: 3.16g/cm ³ , ブレン値: 3270cm ² /g
細骨材	陸砂, 密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 2.83%, 粗粒率: 2.85%
混和剤	高性能減水剤 (ナフタレン系) 増粘剤 (セルロース系)
鉄筋	SR295 (φ9) 黒皮付

Table 2 実験パラメータ
(Experimental Parameter)

試験体No.	W/C	S/C	塩水濃度 (NaCl%)	スリット幅 (mm)	スリット本数 (本)	試験条件	
						温度(℃)	湿度(RH%)
No.1-a,b	0.5	2.5	3	0.4	1	20	90
No.2-a,b				0.05		40	
No.3-a,b				なし	0	20	
No.4-a,b				なし		20	

するため、Fig.7に示すような分割鉄筋を埋め込んだモルタル試験体を作製した。試験体は、作製後28日間湿気養生 (20℃, RH90%) した後、腐食を促進させるために、1日塩水噴霧・2.5日乾燥の乾湿繰り返し養生を行った。試験体の作製に使用した材料をTable 1に、試験体の作製・試験条件をTable 2に示す。試験体は、各実験ケースに対して2体ずつ作製した。

試験体No.1とNo.2では、試験体中央部に、断面の半分にわたってひび割れを模擬したスリットを入れ、マクロセル腐食が起こりやすい状況を作った。分割鉄筋は、試験体中央部に位置する三つの鉄筋要素の長さが各々0.5cm、両端の鉄筋要素が6cmの、合計五つの鉄筋要素からなる。物質の侵入を防ぐために、試験体の両端はエポキシ樹脂でコーティングを施した。

腐食電流、分極曲線および分極抵抗の測定は塩水噴霧開始後7週

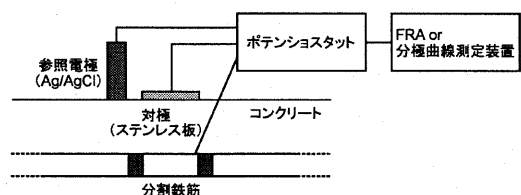


Fig.8 分極曲線、分極抵抗の測定方法
(Measurement Method of Polarization Curve and Polarization Resistance)

Table 3 解析パラメータ
(Calculating Parameter)

説明	値	単位
コンクリート表面の酸素濃度 (20℃)	8.93	mol/m ³
コンクリート表面の酸素濃度 (40℃)	8.17	mol/m ³
酸素の拡散係数 (不飽和)	2.0×10^{-9}	m ² /s
酸素の拡散係数 (飽和)	2.0×10^{-11}	m ² /s
分極曲線	実測による	—
分極抵抗	実測による	$\Omega \text{ cm}^2$
モルタル比抵抗	981.7	$\Omega \text{ cm}$
水膜の厚さ	4.0×10^{-5}	m
Henry定数 (20℃)	3.93	K/10 ⁹ Pa
Henry定数 (40℃)	5.52	K/10 ⁹ Pa

目に行った。

(2) 測定方法

各鉄筋要素の分極曲線はFig.8に示すように測定した。まず、鉄筋要素間を接続しているリード線を一旦切断した後、鉄筋要素上のモルタル表面に照合電極としてAg/AgClを、対極としてステンレス板を設置する。その後、鉄筋要素の電位をポテンショスタットを用いて1秒間に1 mVの割合で分極させ、分極曲線とした。貴に変化させた場合はアノード分極曲線、卑に変化させた場合はカソード分極曲線が得られる。各鉄筋要素の分極抵抗は、Ag/AgClを照合電極、ステンレス板を対極とし、交流インピーダンス法により測定を行った。

モルタルの比抵抗は、試験体と同一調合で作製した、鉄筋を埋め込まないモルタル試験体の抵抗を測定してその値を用いた。

マクロセル電流は隣接する鉄筋要素間のリード線に無抵抗電流計を接続して鉄筋要素間を流れる電流を測定し、マイクロセル電流は各鉄筋要素の分極抵抗から、Stern-Gearyの式 ($I_{\text{corr}} = K/R_p$; I_{corr} は腐食電流量 (A), K は定数 (V), R_p は分極抵抗 ($\Omega \text{ m}^2$)) を用いて計算した。なお、 K の値は文献³⁾などを参考にして、0.0209Vに設定した。

2. 解析条件

解析の設定条件をTable 3に示す。表の中で、酸素の拡散係数は文献⁴⁾を、水膜の厚さは宮里らの研究⁵⁾を参考に設定した。

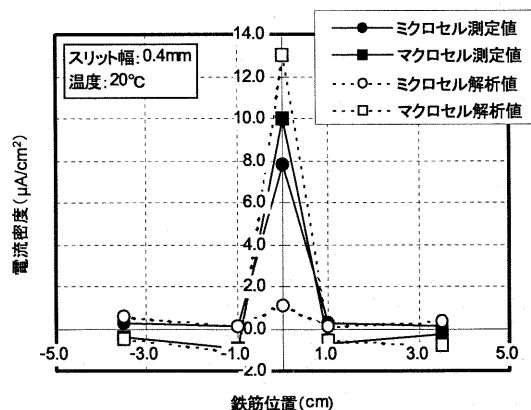


Fig.9 実験・解析結果 : No.1-a
(Experiment and Calculating Result; No.1-a)

モルタル内部の酸素の濃度は、Fickの第二法則を差分法で解いて求めた。スリット内部の酸素濃度はコンクリート表面の酸素濃度と同じと仮定した。また、試験体のコーティングを施した両端の境界の酸素濃度は0と仮定した。

3. 測定結果と解析結果の比較・考察

Fig.9からFig.15に、マクロセル・マイクロセル電流密度の測定結果、および解析結果を示す。縦軸は電流密度 ($\mu \text{ A/cm}^2$)、横軸は試験体中央を原点としたときの各鉄筋要素の中心位置 (cm) である。なお、No.4-bの試験体は測定結果が異常値を示したため、以後の考察からは除外した。

Fig.9からFig.12は、試験体中央部に0.4mm幅のスリットが入った場合の測定・解析結果である。実測値・解析値ともにマクロセル電流密度とマイクロセル電流密度が試験体中央のスリット位置で最大値を示しており、実測値と解析値の傾向が似ていることが確認できる。ただし、Fig.9とFig.10では、解析ではマクロセル電流密度がマイクロセルに比べて卓越する結果となっているが、実測では両者に大きな差は見られなかった。また、Fig.11とFig.12では、実測でマイクロセル電流密度>マクロセル電流密度となっている。なお、Stern-Geary式を使ったマイクロセル電流密度の計算過程に問題がある可能性も考えられ、検討の余地が残されている。

Arrhenius則によると、化学反応の速度は温度が高いほど速くなる。鉄筋腐食についても温度が高いほど腐食電流量が大きいが予想されるが、雰囲気温度20℃での解析・測定結果であるFig.9とFig.10、および雰囲気温度40℃での解析・測定結果であるFig.11とFig.12を比べると、解析値・測定値とも雰囲気温度20℃のほうが電流密度の最大値は大きい。このように、温度以外の要因に腐食速度が左右される場合でも、酸素の拡散律速モデルなど本報で用いた解析方法が適用できる可能性を得られた。

Fig.13とFig.14では、スリット位置での電流密度の実測値が小さく、解析と異なる結果となった。スリット幅が0.05mmと小さいため、スリットが水やモルタルなどで充填され、酸素の供給が遅れたことが考えられる。このような細かいひび割れの扱いについては課題として残された。

Fig.15はスリットのない試験体の実測値および解析値である。1cmの位置にある鉄筋要素におけるマクロセル電流密度の解析値を除けば、実測値・解析値ともマクロセル電流密度・マイクロセル電流

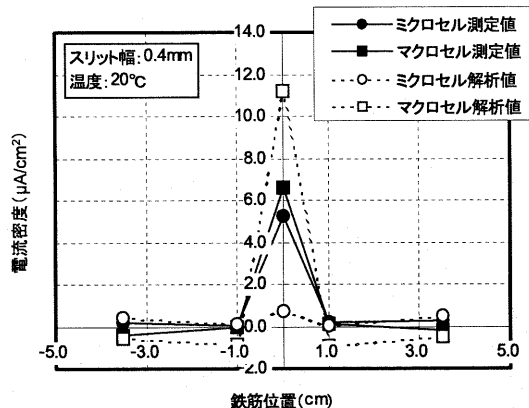


Fig.10 実験・解析結果 : No.1-b
(Experiment and Calculating Result; No.1-b)

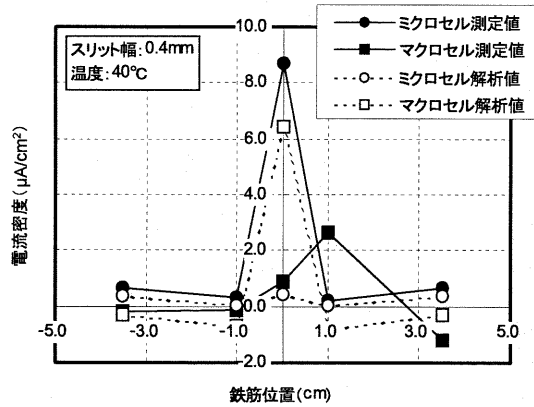


Fig.11 実験・解析結果：No.2-a
(Experiment and Calculating Result; No.2-a)

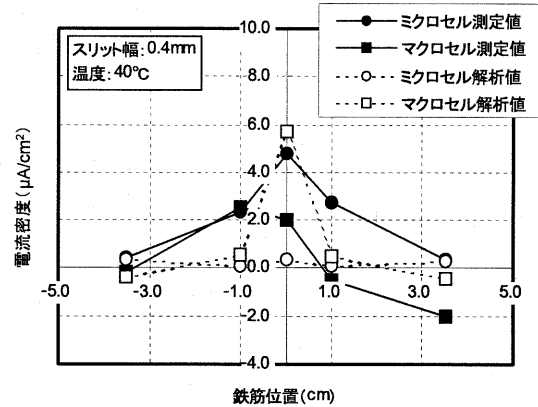


Fig.12 実験・解析結果：No.2-b
(Experiment and Calculating Result; No.2-b)

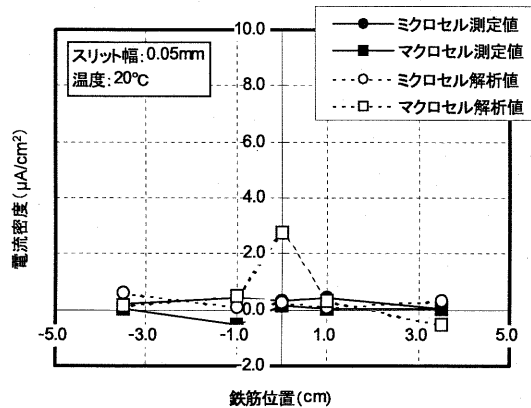


Fig.13 実験・解析結果：No.3-a
(Experiment and Calculating Result; No.3-a)

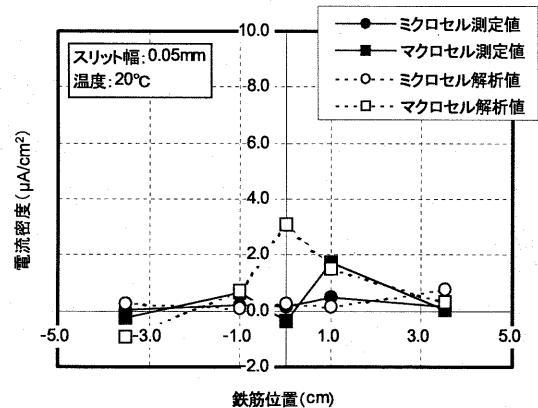


Fig.14 実験・解析結果：No.3-b
(Experiment and Calculating Result; No.3-b)

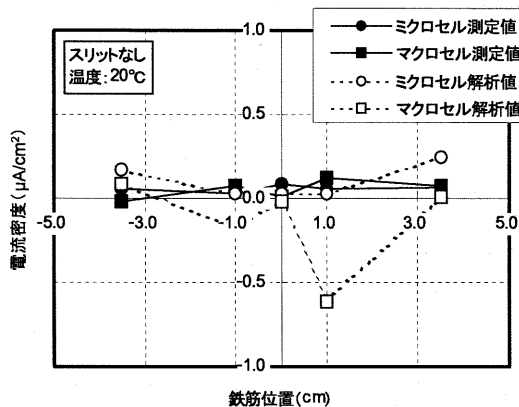


Fig.15 実験・解析結果：No.4-a
(Experiment and Calculating Result; No.4-a)

の場合 (No.1-a,b) に電流密度が最も大きく、スリットが0mm (スリットなし) の場合 (No.4-a,b) に最も小さくなる傾向が確認できた。したがって、スリット幅0.4mm, 0.05mm, なしの順で腐食速度が速くなる可能性が高い。スリット幅によって電流密度が変化すること、今回の実験ではモルタルの打設後塩水を噴霧して腐食を促進させており、スリット幅の大小によって塩化物イオンの浸透速度が異なること、またカソードに関しては酸素の供給速度が異なることが考えられる。

Fig.18は、スリット直下にある鉄筋要素とスリットから離れた鉄筋要素 (鉄筋要素の中心とスリットの距離=3.5cm) の分極曲線を比較した図である。スリット幅別に見た分極曲線と同様に、塩化物イオンや酸素の供給が速いスリット直下の鉄筋要素はアノード・カソード電流密度が大きく、スリットから離れた鉄筋要素は小さいことが確認できた。

V. まとめ

本報では、ひび割れを模擬したスリットを入れたモルタル試験体中の鉄筋腐食速度を解析するための基本的な手法を示し、実験結果と比較して手法の有効性を検討した。検討の結果明らかとなったことを以下に示す。

a. 分極曲線とコンクリート抵抗による電圧降下だけで計算した

密度の絶対値が $0.25 \mu A/cm^2$ 以下である。スリットがない場合の腐食速度についても、解析で予測できることを確認できた。

4. スリット幅と分極曲線の関係

スリット幅と分極曲線の関係を見るため、Fig.16とFig.17に試験体No.1, No.3, No.4のアノード分極曲線とカソード分極曲線を示す。

アノード電流密度・カソード電流密度とも、スリット幅が0.4mm

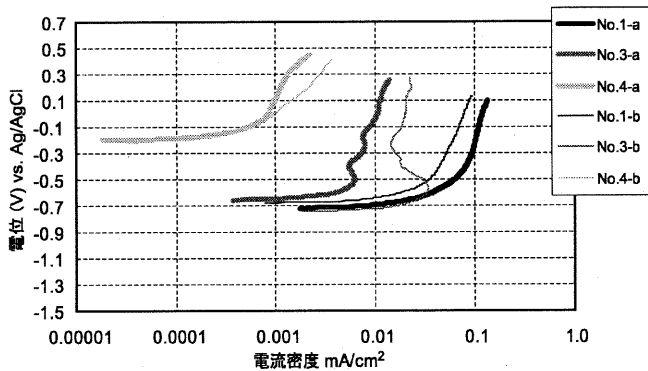


Fig.16 アノード分極曲線の比較
(Comparison of Anodic Polarization Curve)

腐食電流量は、実測値に比べて大きな値（数倍～十数倍）を示した。そこで、本報では酸素の供給速度で決まる限界電流と併せて腐食電流量を計算した。スリット幅0.4mmとスリットなしの試験体について解析値と実測値を比較した結果、全量では両者は概ね近い値を示した。

b. スリット幅0.4mmの試験体を対象とした解析結果と実測値を比較すると、マクロセル電流とミクロセル電流の大きさが逆になった。今後、実験や解析方法の見直しと今回の結果の再検討が必要である。

c. スリット幅が0.4mmの場合、解析・実測ともスリット位置で電流密度が最大になった。0.05mmの場合、実測ではスリット位置で電流密度が最大にならず、解析と異なる結果となった。スリット部の物質輸送特性を考慮した解析モデルの検討が必要である。

d. スリット幅やスリットからの距離が分極曲線に影響を与えることを確認できた。これは、塩化物イオンや酸素などの腐食促進物質の供給速度が電流密度に影響を与えることを示している。

モルタル中の鉄筋の腐食進行は多様なため、腐食速度の解析では、分極曲線を用いる方法や酸素の供給速度から求める方法など、いくつかの方法を併用する必要があることを確認できた。今後は、より実環境に近い状態での腐食速度解析を試みる予定である。

参考文献

- 1) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐; 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, (2001), pp.547-552.
- 2) 親本俊憲, 横関康祐, 宮里心一, 長谷川裕介; ひび割れを有するモルタル中の鉄筋腐食速度解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, (2004.7), pp.1089-1094.

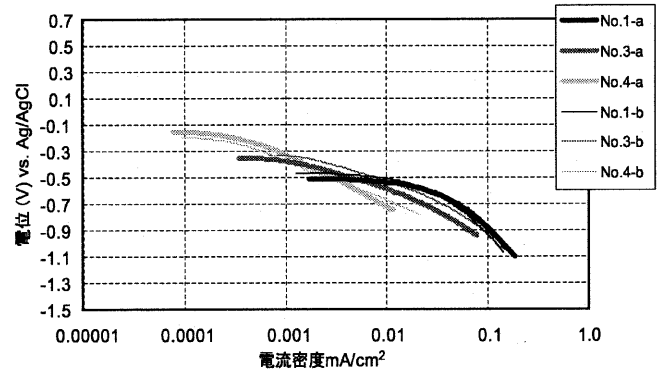


Fig.17 カソード分極曲線の比較
(Comparison of Cathodic Polarization Curve)

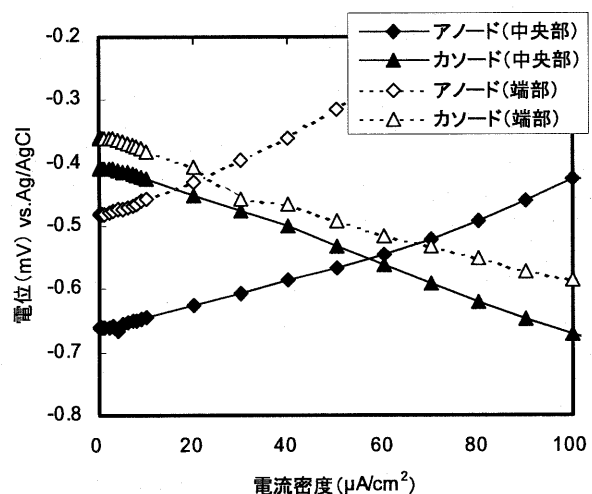


Fig.18 鉄筋位置による分極曲線の比較: No.2-a
(Comparison of Polarization Curve from the Position of Separated Rebars; No.2-a)

- 3) 水流徹, 前田龍, 春山志郎; 交流法腐食モニターの局部腐食への適用, 防食技術, 28, (1979), pp.638-644.
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会; コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書 (III), (1996).
- 5) 宮里心一; 鉄筋コンクリート欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究, 東京工業大学博士論文, (2001.4).
- 6) 長谷川裕介, 宮里心一, 平石陽一, 親本俊憲, 横関康祐; 塩害環境下におけるモルタル中鉄筋の分極曲線の評価, 土木学会第59回年次学術講演会第5部, (2004.9), pp.225-226.