

## 論文 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

宮里 心一\*1・大即 信明\*2・小長井 彰祐\*3

**要旨:** 本研究では、コンクリート供試体内部に埋設する鉄筋を分割し、打継目近傍に生じるマクロセルおよびマイクロセルの腐食電流を定量的に測定する方法に関して、実験的および理論的な検討を行なった。本研究の結果、①分割鉄筋を用いることにより鉄筋内部を流れるマクロセル電流を定量的に測定できること、②マクロセル電流とマイクロセル電流を合計した総腐食電流の値は分割された鉄筋を用いることによる影響を受けないこと、③打継目近傍のマクロセル電流を正確に測定するためには分割鉄筋の要素長さを 15mm 以下にする必要があること、が明らかになった。

**キーワード:** マクロセル腐食, 腐食電流, 分割鉄筋, 打継目

## 1. はじめに

コンクリートの材料特性の一つとして、圧縮強度は高く、引張強度は低いことが挙げられる。部材において、その弱い引張部に鉄筋を配置して補強したものが鉄筋コンクリートである。すなわち、鉄筋は引張に耐えるための材料であり、実構造物中では応力を伝達すべき範囲では連続して配筋されている。

コンクリート内部の鉄筋の腐食形態は、マクロセル腐食とマイクロセル腐食に大別される<sup>1)</sup>。このうちマクロセル腐食とは、アノードとカソードが明らかに異なる個所に位置する腐食を指す。したがって、マクロセルを構成するアノードとカソード間の鉄筋中を流れる腐食電流が、マクロセル電流である。そのため、もしマクロセル電流を測定するならば、鉄筋内部を流れる電流を測定する必要がある。しかしながら、上述した通り実在するコンクリート部材中の鉄筋は連続しており、その内部を流れる電流を測定することは困難である。

以上の背景を受け、これまでの研究では、コンクリート供試体内部に埋設される鉄筋を分割

し、マクロセル電流およびマイクロセル電流を区別して定量的に測定する方法が用いられてきた<sup>2)</sup>。その結果、ひび割れや打継目等の欠陥近傍に生じる局部腐食（マクロセル腐食）の形態や速度に関する知見が新たに得られ、その方法の有用性は実証されている。しかしながら、従来の研究では、①マクロセル電流、マイクロセル電流、総腐食電流の関係、②分割鉄筋の要素長さに関する条件、は詳細に検討されていない。したがって、本研究では、分割鉄筋を用いた腐食電流測定方法を確立するために、実験的・理論的な検討を行い、上記①および②を明らかにすることとした。

ここで、コンクリート供試体内部に埋設する分割鉄筋の作製方法を示す。分割鉄筋より構成された鋼材の概略を、図-1に示す。任意の長さで切断した鉄筋の両側端部にリード線をはんだ付けする。その後、エポキシ樹脂により分割鉄筋要素間の絶縁と接続を行う。隣接する分割鉄筋要素の近接側リード線を接合することにより、電気的には一体とみなせる鋼材を作製する。

この様に、コンクリート供試体内部に埋設さ

\*1 東京工業大学大学院助手 理工学研究科国際開発工学専攻 博(工) (正会員)

\*2 東京工業大学大学院教授 理工学研究科国際開発工学専攻 工博 (正会員)

\*3 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

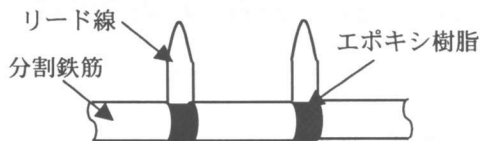


図-1 分割鉄筋より構成された鋼材

れる鉄筋を分割することにより、鉄筋内部を流れるマクロセル電流を測定可能とした。すなわち、図-2に示す様に隣接する鉄筋要素間を流れる電流は、直接鉄筋内部を流れるのではなく、その間に介される電流計を通過する。これにより、マクロセル電流の測定を可能とした。

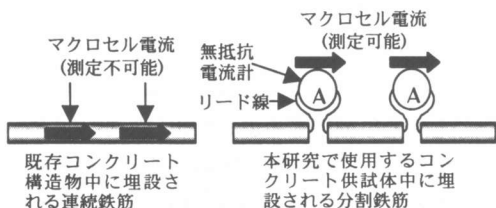


図-2 連続鉄筋と分割鉄筋の相違

## 2. マクロセル電流とマイクロセル電流の測定方法

本研究では、アノードとカソードが異なる鉄筋要素に跨り形成される腐食セル(回路)をマクロセルとし、それに伴う腐食をマクロセル腐食とする。したがって、マクロセル電流は、異なる分割鉄筋要素間を流れる電流を意味する。一方、アノードとカソードが単一の分割鉄筋要素内に存在する腐食セル(回路)をマイクロセルとし、それに伴う腐食をマイクロセル腐食とする。さらに、総腐食電流は、マクロセル電流とマイクロセル電流を合計することにより求める。本章では、分割鉄筋要素を有する供試体を用いた場合の、各腐食電流の測定方法を検討する。

### 2.1 マクロセル電流の測定方法

隣接する分割鉄筋要素間のリード線に無抵抗電流計を介し、電流(マクロセル電流)を求める。そして、対象とする分割鉄筋要素の両端から流入する電流を合計する。この電流を、分割鉄筋要素の表面積で除することにより、分割鉄筋要

素表面でのマクロセル電流密度を算定する。例えば、図-3に示す鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度( $a_i$ )は、式(1)で表せる。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} + A_{i,i+1}}{S_i} \quad (1)$$

ここで、 $S_i$ は鉄筋要素*i*の表面積を示す。

なお、対象とする分割鉄筋要素がアノードの場合、電流密度は正となる。一方、対象とする分割鉄筋要素がカソードの場合、電流密度は負となる。

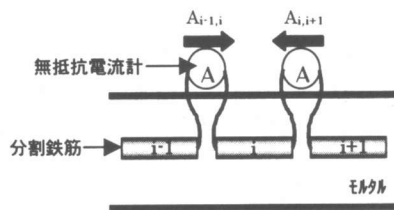


図-3 マクロセル電流の測定

### 2.2 ミクロセル電流の測定方法

マイクロセル腐食は、同等の環境に接する鉄筋において生じる均一的な腐食であり、アノードとカソードの鉄筋電位は概ね等しい。ここでは、式を誘導し、マイクロセル電流の測定方法について検討する。

コンクリート中铁筋の腐食反応においても、あらゆる電極に関する基本式である、Butler-Volmerの式が成立する<sup>3)</sup>。

$$i = i_0 \exp\left[\frac{-\beta F \eta}{RT}\right] \quad (\text{アノード側}) \quad (2)$$

ここで、 $\beta$ は symmetry factor であり、0.5とすることが多い。また、 $i_0$ は腐食電流( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )、 $R$ は気体定数( $0.0821\text{L}\cdot\text{atm}/\text{K}/\text{mol}$ )、 $T$ は絶対温度(K)、 $F$ はファラデー定数( $96500\text{C}$ )、 $i$ は分極電流(A)、 $\eta$ は過電圧(V)を表す。

過電圧を $-\Delta\eta$ 、それに起因する電流変化を $\Delta i$ とすると、 $\eta = \eta_0 - \Delta\eta$ 、 $i = i^* + \Delta i^*$ となる。これを、式(2)に代入すると、式(3)となる。

$$i = i^* + \Delta i^*$$

$$\begin{aligned}
 &= i_0 \exp\left[\frac{-\beta F(\eta_0 - \Delta\eta)}{RT}\right] \\
 &= i_0 \exp\left(-\frac{\beta F\eta_0}{RT}\right) \times \exp\left(\frac{\beta F\Delta\eta}{RT}\right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\beta = 0.5$ 、 $i_0 \exp\left(-\frac{\beta F\eta_0}{RT}\right) = A$  とおく。

その結果、式(3)は、式(4)となる。

$$i = i^* + \Delta i^* = A \cdot \exp\left(\frac{0.5F\Delta\eta}{RT}\right) \quad (4)$$

上式の右辺をマクローリン展開する。その際、マイクロセルにおいてはアノードとカソードの電位差が小さいので、 $-\frac{RT}{0.5F} \ll \Delta\eta \ll \frac{RT}{0.5F}$  である。

したがって、マクローリン展開後の右辺に関して、次数の大きい3項目以降を無視できる。その結果、式(4)は式(5)となる。

$$\begin{aligned}
 i^* + \Delta i^* &= A \left(1 + \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta\right) \\
 &= A + A \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta \quad (5)
 \end{aligned}$$

よって、定数と変数を分離し、 $i^*$ および $\Delta i^*$ を求める。

$$i^* = A = i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta i^* &= A \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta \\
 &= i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \frac{0.5F}{RT} \Delta\eta \quad (7)
 \end{aligned}$$

ここで、分極抵抗 $R_p$ と、分極電流および過電圧の関係は式(8)に示される通りである。

$$\Delta\eta = R_p \cdot \Delta i^* \quad (8)$$

よって、式(7)と式(8)を比較し、分極抵抗と腐食電流の関係を求める。

$$\frac{1}{R_p} \frac{\Delta i^*}{\Delta\eta} = i_0 \exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right) \frac{0.5F}{RT} \quad (9)$$

したがって、マイクロセル電流は、式(10)の通りとなる。

$$i_0 = \frac{RT}{0.5F} \cdot \frac{1}{\exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (10)$$

よって、 $\frac{RT}{0.5F} \cdot \frac{1}{\exp\left(-\frac{0.5F\eta_0}{RT}\right)} = K$  とおくと、ミ

クロセル電流は式(11)により示される。

$$i_0 = \frac{K}{R_p} \quad (11)$$

以上のことを踏まえ、マイクロセル電流の測定は次の様に行った。はじめに、分割鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断する。この時、異なる分割鉄筋要素間では電流の出入がなく、分割鉄筋要素内では鉄筋電位が概ね一様となる。この状態で、各分割鉄筋要素毎の鉄筋表面の分極抵抗をFRA(Frequency Response Analyzer)を用いた交流インピーダンス法により求める。概略を図-4に示す。測定は、5000Hz から0.0005Hzの範囲において、振幅50mVの電圧を与えることにより行う。また、分極抵抗は、ボード線図およびコールコールプロットを用い算定する。そして、式(12)を用いて鉄筋要素*i*のマイクロセル電流密度( $b_i$ )を算定する。

$$b_i = \frac{K}{R_{p_i} \cdot S_i} \quad (12)$$

ここで、 $R_{p_i}$ は鉄筋要素*i*における分極抵抗である。またKは局部腐食を対象とし検討された文献4)を参考にし、0.0209(V)とする。

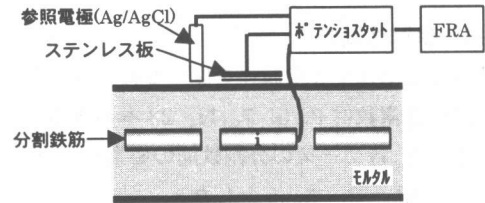


図-4 分極抵抗の測定

なお、対象とする分割鉄筋要素では、同等の速度でアノード反応とカソード反応が進行している。したがって、アノード電流密度とカソード電流密度は等しい。本研究では、アノード電流密度のみを正で示すこととする。

### 3. 実験的検討

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

セメントは、表-1に示す物理的性質および化学成分の普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、表-2に示す物理的性質の千葉県小櫃産の細骨材(陸砂)を使用した。鉄筋は、表-3に示す化学成分の鉄筋(丸鋼,  $\phi$  9mm, SR295)を使用した。

表-1 セメントの物理的性質および化学成分

密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.16		安定性	良	
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3270		化学 成分 %	MnO	1.6
凝結 (h·m)	始発	2-35		SO <sub>3</sub>	1.9
	終結	3-49		Cl	0.006
圧縮強度 (MPa)	7日	43.0		全アルカリ	0.62
	28日	60.2		Ig.Loss	1.4

表-2 細骨材(陸砂)の物理的性質

比重	表乾	2.60	吸水率(%)	2.20
	絶乾	2.54	単位容積質量(kg/l)	1.74
粗粒率	2.59	実績率(%)	67.1	

表-3 鉄筋の化学成分

化学成分(%)						降伏点 (MPa)
Fe	C	Si	Mn	P	S	
99.13	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023	354

##### (2) 供試体概要

使用したモルタル供試体を図-5に示す。分割鉄筋の要素数は3, 5, 7, 11, 23本の5水準を設定した。各ケースの分割鉄筋の要素長さは、65, 35, 25, 15, 5mmとした。

##### (3) モルタルの配合および基本性状

モルタルの水セメント比は50%, S/Cは2.5とした。フレッシュモルタルのフローは180, 空気量は3%とした。圧縮強度は、 $\phi$ 5×10cmの円柱供試体を用い、28日間の湿潤養生後測定した。その結果、39.7MPaであった。

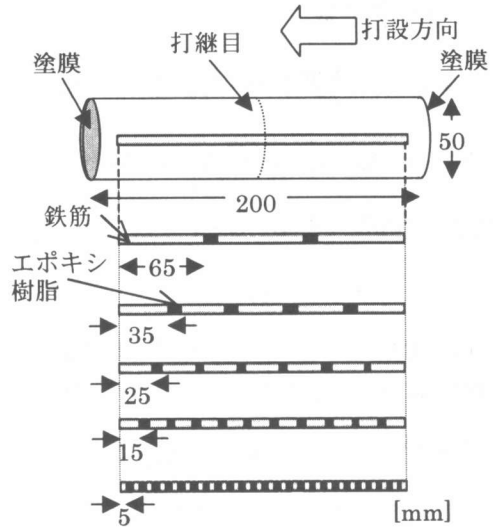


図-5 供試体概要図(モルタル)

##### (4) 供試体の作製方法および暴露条件

1章に示す通り前処理した鋼材を型枠中心に配置する。供試体の中央に打継目を生じさせるため、モルタルは2層に分けて打設した。初めに、直径50mm, 高さ200mmの型枠の半分まで打設した。24時間経過後、表面のレイタンスを十分に除去し、さらに2層目を打設した。また、外部環境からの塩化物イオン、酸素および水分の浸透が、かぶりがある一定である供試体の側面のみから生じる様に、脱型直後に上面と下面( $\phi$ 5cm)をシリコン材で塗膜した。材齢28日まで、相対湿度80%室温20℃にて湿空養生を行った。その後、24時間の塩水浸漬(NaCl 3.1wt%)と24時間の乾燥(相対湿度50%)が繰り返される、腐食促進環境下に56日間暴露した。なお、室温は20℃とした。

#### 3.2 実験結果および考察

図-6に、分割鉄筋の要素長さが35mmの場合における、マクロセル電流密度およびマイクロセル電流密度を示す。これによると、両電流密度ともに、測定ができることが確認される。

図-7に、分割鉄筋の要素長さの相違が腐食電流に及ぼす影響を示す。縦軸には、各供試体中の全鉄筋要素で測定されたマクロセルアノー

ド電流およびマイクロセルアノード電流の和を示す。また、マクロセルアノード電流とマイクロセルアノード電流を加えた、総腐食電流も示す。これによれば、分割鉄筋の要素長さの相違に関わらず、総腐食電流の和は一定であることが認められる。また、分割鉄筋の要素長さが短いほど、マクロセルアノード電流の和は増加し、マイクロセルアノード電流の和は減少することが認められる。なお、本実験の範囲では、分割鉄筋の要素長さが 15mm 以下であれば、マクロセルアノード電流およびマイクロセルアノード電流の値は概ね一定となる。

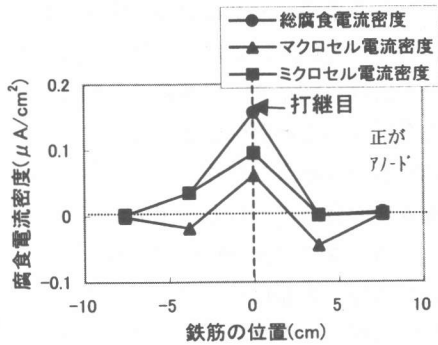


図-6 要素長さ 35mm の分割鉄筋を用いた場合の腐食電流

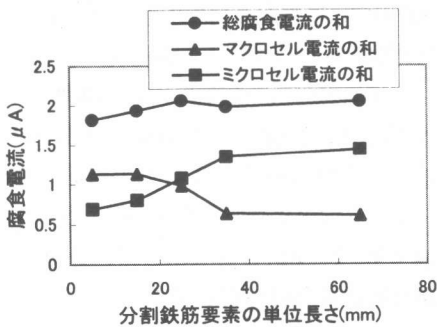
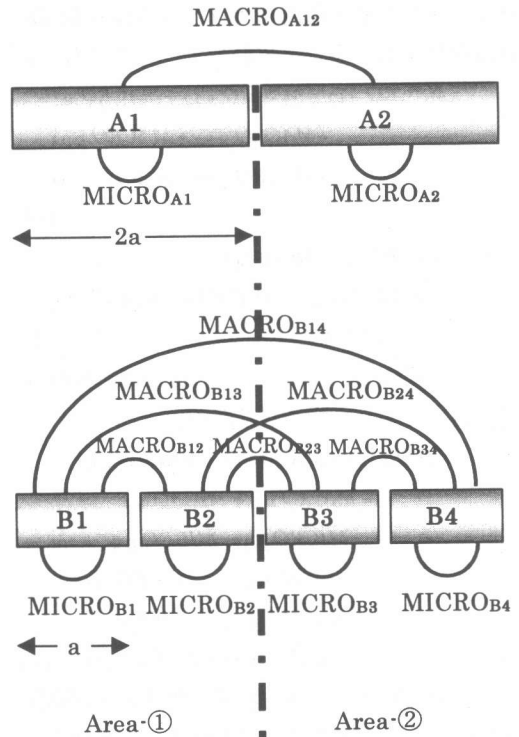


図-7 分割鉄筋の要素長さの相違が腐食電流に及ぼす影響

#### 4. 理論的検討

図-8を参考にし、分割鉄筋の要素長さが  $2a$  および  $a$  の場合のマクロセル電流、マイクロセル電流および総腐食電流の関係を説明する。

分割鉄筋の要素長さによらず、任意の範囲の鉄筋に供給される塩化物イオン、酸素および水分の量は等しい。したがって、図-8において、中心線より左側を Area-①、右側を Area-②とした場合、要素長さが  $2a$  の場合の分割要素 A1 に供給される各種腐食要因物質量と、要素長さが  $a$  の場合の分割要素 B1 と B2 に供給される各種腐食要因物質量の和は、同等であると考えられる。同様に Area-②に関しても、分割要素 A2 に供給される各種腐食要因物質量と、分割要素 B3 および B4 に供給される各種腐食要因



注)  $MACRO_{A12}$ とは、A1とA2間を流れるマクロセル電流を示す。 $MICRO_{A1}$ とは、A1内を流れるマイクロセル電流を示す。

図-8 マクロセル電流およびマイクロセル電流の関係

物質量の和は同等である。すなわち、B1とB2を組み合わせた要素を考えた場合、鉄筋腐食に関してA1と同様の速度となるはずである。同様にB3とB4を組み合わせた要素を考えた場合、A2と同等の腐食電流となるはずである。したがって、図-8に関しては、次式の関係が成立する。

$$\begin{aligned} MICRO_{A1} &= MICRO_{B1} + MICRO_{B2} \\ &+ MACRO_{B12} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} MICRO_{A2} &= MICRO_{B3} + MICRO_{B4} \\ &+ MACRO_{B34} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} MACRO_{A12} &= MACRO_{B13} + MACRO_{B14} \\ &+ MACRO_{B23} + MACRO_{B24} \end{aligned} \quad (15)$$

したがって、式(16)に示す通り、マクロセル電流の和は、要素長さがaの場合が2aの場合と比較して、大きくなる。一方、式(17)に示す通り、マイクロセル電流の和は、要素長さが2aの場合がa本の場合と比較して、大きくなる。

$$\begin{aligned} MACRO_{A12} &< MACRO_{B12} + MACRO_{B13} \\ &+ MACRO_{B14} + MACRO_{B23} \\ &+ MACRO_{B24} + MACRO_{B34} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} MICRO_{A1} + MICRO_{A2} \\ &> MICRO_{B1} + MICRO_{B2} + MICRO_{B3} \\ &+ MICRO_{B4} \end{aligned} \quad (17)$$

また、式(18)に示す通り、総腐食電流の和は要素長さに関わらず等しくなる。

$$\begin{aligned} MICRO_{A1} + MICRO_{A2} + MACRO_{A12} \\ &= MICRO_{B1} + MICRO_{B2} \\ &+ MICRO_{B3} + MICRO_{B4} \\ &+ MACRO_{B12} + MACRO_{B13} \\ &+ MACRO_{B14} + MACRO_{B23} \\ &+ MACRO_{B24} + MACRO_{B34} \end{aligned} \quad (18)$$

以上のことから、分割鉄筋の要素長さは総腐食電流の和に影響を及ぼさないことが確認された。したがって、分割鉄筋の要素長さが無限に長い場合、すなわち鉄筋が分割されていない場合と、分割鉄筋の要素長さが有限である場合とにおいて、総腐食電流の和は一定であることになる。このことと3章の実験的検討を踏まえる

と、分割鉄筋を用いた供試体における総腐食電流の和と、通常の非分割鉄筋を用いた供試体における総腐食電流の和は、同等であるといえる。しかしながら、本研究におけるマクロセル電流およびマイクロセル電流の定義の下では、マクロセル電流の和は要素長さが短いほど増加し、マイクロセル電流の和は要素長さが長いほど増加することが確認された。

## 5. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 内部鉄筋を分割した供試体を用いることにより、マクロセル電流とマイクロセル電流を区別して定量的に測定することができた。
- ② マクロセル電流とマイクロセル電流を加えた総腐食電流の値は、鉄筋を分割することの有無および分割鉄筋の要素長さの相違の影響を受けないことが確認された。
- ③ 分割鉄筋の要素長さが短いほど、全分割鉄筋要素におけるマクロセル電流の和は増加し、一方マイクロセル電流の和は減少した。したがって、欠陥近傍のマクロセル電流を定量的に測定するためには、分割鉄筋の要素長さを短くする必要があることが明らかとなった。なお、本実験結果に基づけば、分割鉄筋の要素長さは15mm以下にする必要があると判断された。

## 参考文献

- 1) 大即信明, 樫野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版, 1986
- 2) 大即信明, 宮里心一, 鈴木裕隆, 木村勇人: 曲げひび割れ近傍に生じる主鉄筋とスターループの塩化物腐食形成機構, 土木学会論文集, No.627, pp.161-177, 1999
- 3) 腐食防食協会編: 腐食・防食ハンドブック, 丸善, 2000
- 4) 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, pp.638-644, 1979