

論文 自然電位法と交流インピーダンス法を用いた鉄筋の マクロセル腐食電流の推定

宮里心一^{*1}・長滝重義^{*2}・大即信明^{*3}・柴田常德^{*4}

要旨：断面修復部および曲げひび割れ部に生じる鉄筋のマクロセル腐食機構を、等価な電気回路に置き換え、解析的な検討を行った。電気回路は、鉄筋表面の分極抵抗およびコンクリートの比抵抗により形成した。そして、断面修復部および曲げひび割れ部における鉄筋を数個の要素に分割し、各要素の電位と分極抵抗、および各要素間のコンクリートの比抵抗から、隣接する要素間を鉄筋内部を通して流れるマクロセル腐食電流を推定した。さらに、推定値と供試体により測定された実験値と比較した。その結果、本推定方法により、マクロセル腐食電流の定性的な評価が可能であることがわかった。

キーワード：断面修復、曲げひび割れ、鉄筋電位、分極抵抗、比抵抗、腐食電流

1. はじめに

塩分環境下における鉄筋コンクリート構造物は、塩害により劣化する可能性が高い。その中でも、断面修復部あるいは曲げひび割れ部においてマクロセルが形成すると、腐食の進行は促進されると報告されている[1], [2]。したがって、コンクリート中の鉄筋のマクロセル腐食を評価することは重要である。現在、コンクリート中の鉄筋の腐食を非破壊的に評価する方法として、自然電位法あるいは交流インピーダンス法が用いられることが多い。自然電位法は鉄筋の腐食状態を、交流インピーダンス法による分極抵抗は腐食速度を、さらに比抵抗は腐食環境を推定するには有効である[3]。しかしながら、いずれも測定箇所の局所的な腐食を評価しているに過ぎず、マクロセル形成時のアノードおよびカソードを判断するためには、鉄筋内部を流れるマクロセル腐食電流を推定することが必要である。以上のことから、本研究では、自然電位法および交流インピーダンス法を用いて測定した電位および抵抗値を用いて、特に断面修復部および曲げひび割れ部におけるマクロセル腐食電流の推定を試みた。

表-1 鉄筋の化学成分

(%)

形状	Fe	C	Si	Mn	P	S
丸鋼	99.126	0.12	0.12	0.58	0.031	0.023
異形	98.837	0.21	0.18	0.72	0.021	0.032

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントは、研究用普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、千葉県小櫃産の細骨材（山砂）および東京都青梅産の粗骨材（碎石）を使用した。混和剤は、水セメント比が100%のモルタルあるいはコンクリートにおいて、メチルセルローズ系水中不分散性混和剤を水質量に対して、1.2%添加した。また、水セメント比が30%のモルタルあるいはコンクリートにおいて、ナフタレン系高性能A E減水剤をセメント質量に対して、2%添加した。鋼材は、表-1に示す化学成分の丸鋼（Φ9mm）および異形鉄筋（D10）を使用した。一部の補修材は、水粉体比が約11%のアクリル系ポリマーセメントモルタルを使用した。

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻、工修（正会員）

*2 新潟大学教授 工学部建設学科、工博（正会員）

*3 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科、工博（正会員）

*4 株式会社大林組、工修

2. 2 供試体の作製方法

本研究で使用した供試体を、図-1に示す。Type A およびType B 供試体は、断面修復部をモデル化しており、Type C 供試体は、曲げひび割れ部をモデル化している。

(1) Type A 供試体

Type A 供試体は、モルタルにより作製した。使用した鋼材は、各要素毎の電位、分極抵抗、要素間のモルタルの比抵抗および要素間を流れる腐食電流を測定するため、6本に分割した。長さ2.5cmの各鉄筋は、電動ワイヤブラシにより黒皮を剥ぎ、両側端部にリード線をはんだ付けした後、切断およびはんだ付けの影響を防ぐため、端部から0.25cmの範囲をエポキシ樹脂により被覆した。さらに同様のエポキシ樹脂によって要素間の絶縁と接続を行い、リード線を繋いで電気的には1体とみなせる鉄筋とした。

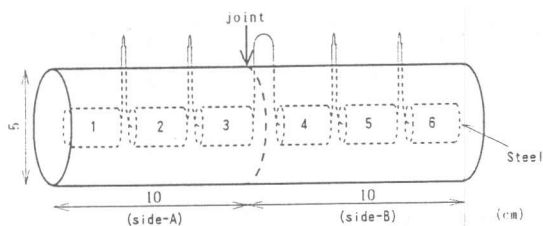
打設方法は、要素番号3と4の鉄筋の中間部で打継目が生じるように鋼材を鉛直方向に配置した型枠に、先ず補修材を対象とした塩化物イオン含有量の少ない側のモルタルを打設した。24時間湿空養生を行った後、レイタンスをワイヤブラシにより除去し、母材を対象とした塩化物イオン含有量の多い側のモルタルを打設した。なお、モルタルの打設方向は、補修材側及び母材側ともに、鋼材に平行とする。打設後24時間湿空養生した後脱型し、打継目からの酸素および水分の浸透を防ぐため、打継目周囲を幅1cmの範囲でエポキシ樹脂にて塗装した。その後、相対湿度80%室温20℃の環境中に暴露した。

(2) Type B 供試体

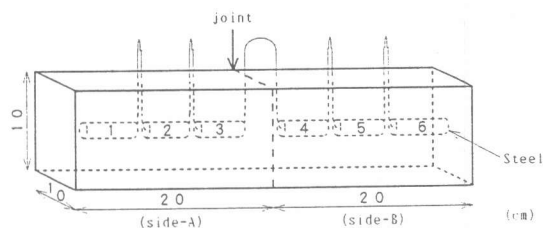
Type B 供試体は、コンクリートにより作製した。Type B 供試体においても、打設手順はType A 供試体と同様である。ただし、鋼材は水平方向に配置し、コンクリートの打設方向は、鋼材と垂直とする。また、鉄筋要素の長さは、打継目から遠い鉄筋要素1および6が7.5cm、一方打継目に近い鉄筋要素2～5は4.5cmとした。

(3) Type C 供試体

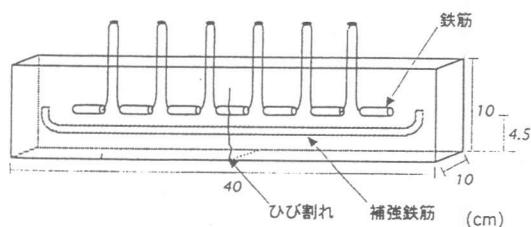
Type C 供試体は、モルタルにより作製した。鋼材の準備手順はType A 供試体と同様である。ただし、鉄筋は7本の要素に分割し、各鉄筋の長さは4.5cmとした。また、曲げ補強のため、全面をエポキシ樹脂にて塗装した丸鋼を埋設した。打設方向は、鋼材に垂直とする。打設後24時間湿



(a) Type A 供試体



(b) Type B 供試体



(c) Type C 供試体

図-1 供試体概要図

空養生した後脱型し、相対湿度80%室温20℃の環境中に1ヶ月間養生した。その後中央の鉄筋要素を貫く位置にて曲げひび割れを生じさせ、ひび割れ開口部を除く5面をエポキシ樹脂にて塗装した。そして、24時間の塩水噴霧（NaCl3.5wt%、湿度90%）と60時間の乾燥（湿度50%）が繰り返される環境下に曝露した。なお、腐食反応を促進させるため、室温は60℃とした。

(4) 配合およびひび割れ幅

各供試体の配合およびひび割れ幅のパラメータを、表-2に示す。

2. 3 測定方法

3ヶ月間の曝露後、測定を行った。

(1) 鉄筋電位の測定

鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、照合電極に飽和硫酸銅電極を用い、鉄筋電位を測定した。

(2) 分極抵抗の測定

鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、異なる鉄筋要素間では電流の出入が無い状態にし、各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た。概略図を図-2に示す。

表-2 配合とひび割れ幅のパラメータ

	補修材側		母材側	
	材料	Cl ⁻	W/C	Cl ⁻
Type A	W/C=0.3, 0.5, 1.0	0.5 kg/m ³	0.3, 0.5, 1.0	15.0 kg/m ³
Type B	コンクリート W/C=0.3, 1.0 ポリアセメントモルタル		0.5	
Type C	W/C		0.1, 0.3, 0.7mm	

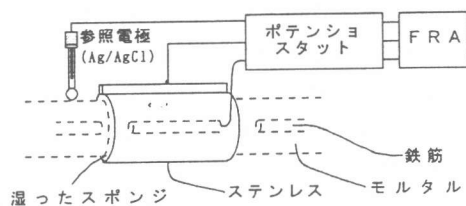


図-2 分極抵抗の測定概略図

(3) 比抵抗の測定

鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断し、隣接する鉄筋要素間にFRAを接続し、隣接する鉄筋要素間のモルタルあるいはコンクリートの比抵抗を測定した。

(4) マクロセル電流密度の測定

隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続し電流(マクロセル電流)を求めた。そして、対象とする鉄筋要素の両端から出入する電流を合計し、鉄筋要素の表面積で除することにより、鉄筋要素表面でのマクロセル電流密度を算定した。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。

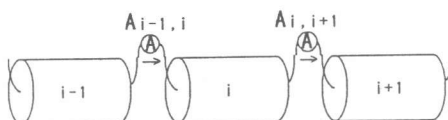


図-3 マクロセル電流密度の測定説明図

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i,i+1}}{d_i \times \pi \times l_i} \quad (1)$$

ここで、 d_i = 鉄筋要素iの直径（丸鋼9mm、異形鉄筋10mm）、 l_i = 鉄筋要素iの長さ

そして、対象とする鉄筋要素表面にて外部に流出するアノード電流密度は正、外部から流入するカソード電流密度は負として表した。なお、腐食電流密度が $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ は、侵食度が $1\text{mm}/\text{年}$ に相当する。

3. 解析概要

コンクリート内部の鉄筋の塩害による腐食は、電気化学的反応と考えられている。そして、既

往の研究によれば、鉄筋表面には電気二重層と呼ばれる薄い層があり、これを電気回路に置き換えると、抵抗とコンデンサーが並列に接続されたものと見なせることが出来る。ただし、コンクリート内部で形成するマクロセルの場合、電流は一方方向にのみ流れるため、コンデンサーは定常状態における腐食速度を支配する要因ではないと考え、モデルに組み込まないこととした。さらに、コンクリート内の電子・イオンの透過は、比抵抗により評価することとした。なお、本研究では、鉄筋内部の電流は一軸方向にだけ流れ、また電流の広がりやコンクリート内部の有限領域で収束すると仮定する。そして、ここでは鉄筋が一本の単純構造の場合を検討した。

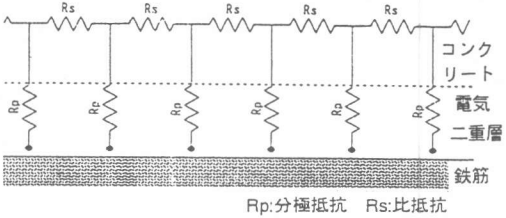


図-4 マクロセルの電気化学的モデル

図-4に、マクロセル腐食機構の電気化学的モデルを示す。このモデルでは、分極抵抗、比抵抗および鉄筋電位を代入することにより、鉄筋内部を流れる電流が求まる。ここで、図-5を用い、具体的な解析手法について説明する。初めに、測定された鉄筋電位、分極抵抗および比抵抗をモデルに代入する。次に、モデル内の電位の未知な点(図-5中では、点2, 4, 6, 8, 10, 12)における電位を求める。この際、ある二点間における電位の微小時間の交換量は、二点間の電位勾配に比例し抵抗に反比例するという前提から、式(2)を立てた。

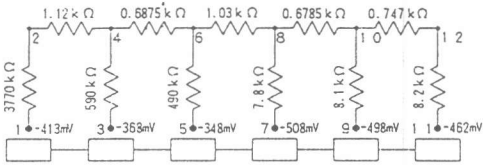


図-5 モデルへの測定値の代入例

$$\Delta V = \Delta u \times \frac{1}{R} \times \Delta t \quad (2)$$

ここで、 ΔV は電位の変化量、 Δu は二点間の電位勾配、 R は二点間の抵抗、 Δt は微小時間を表す。

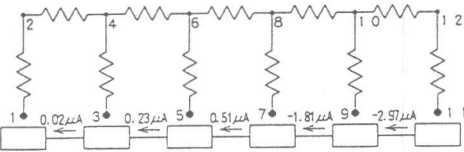


図-6 モデルを用いた解析例

そして、各点毎の基本式を連立方程式として解くことにより、全ての点における電位を求めた。最後に、各点間の電位差を抵抗で割ることにより、図-6に示す様に、鉄筋要素間の電流値が求まる。

4. 結果および考察

4. 1 断面修復部に対する検討

図-7に、モルタルを用いて作製されたType A 供試体における、マクロセル電流密度の分布形状を示す。配合は、補修材側モルタルの水

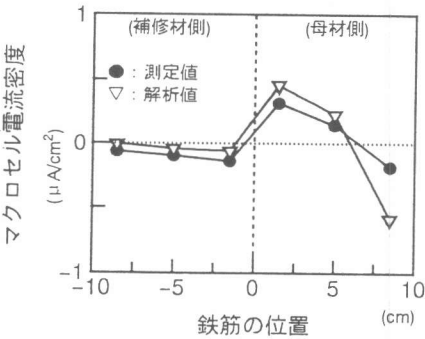


図-7 マクロセル電流密度の分布形状 (Type A)

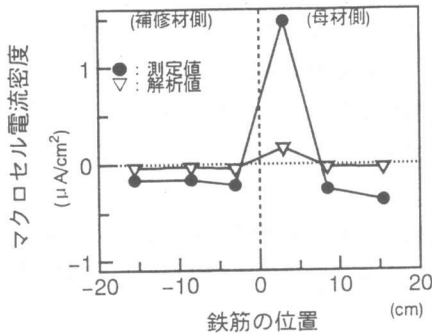


図-8 マクロセル電流密度の分布形状
(Type B 例1)

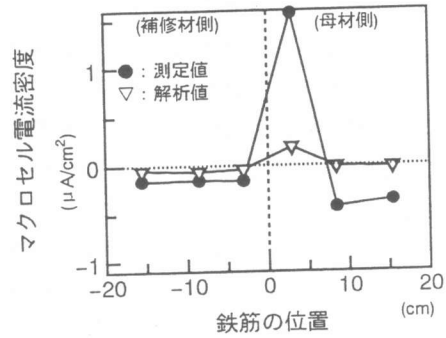


図-9 マクロセル電流密度の分布形状
(Type B 例2)

セメント比が50%、塩化物イオン含有量が 0.5 kg/m^3 であり、母材側モルタルの水セメント比が100%、塩化物イオン含有量が 15.0 kg/m^3 である。これによると、解析値および測定値はいずれも、塩化物イオン含有量の多い母材側の打継目近傍でアノード電流が発生し、塩化物イオン含有量の少ない補修材側および母材側の打継目から遠い部分でカソード電流が発生することが確認できる。つまり、解析値と測定値の分布形状は等しく、正負の符号はいずれの鉄筋位置においても一致することが認められる。また、図

$$\begin{aligned} \text{Type A: } Y &= 0.000538 + 0.7586X \quad R = 0.790274 \\ \text{Type B: } Y &= -0.002712 + 0.0520X \quad R = 0.294146 \end{aligned}$$

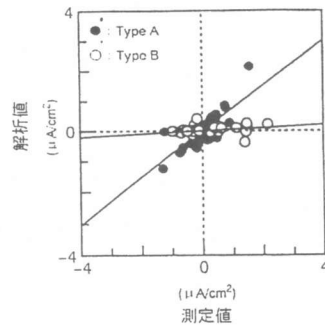


図-10 解析値と測定値の比較

8および図-9に、コンクリートを用いて作製されたType B 供試体における、マクロセル電流密度の分布形状を示す。配合は、補修材側がポリマーセメントモルタルであり、母材側コンクリートが水セメント比は50%、塩化物イオン含有量が 15.0 kg/m^3 である。これらによっても、解析値および測定値はいずれも、塩化物イオン含有量の多い母材側の打継目近傍でアノード電流が発生し、塩化物イオン含有量の少ない補修材側および母材側の打継目から遠い部分でカソード電流が発生することが確認できる。つまり、解析値と測定値の傾向は等しく、正負の符号はいずれの鉄筋位置においても一致することが認められる。したがって、本モデルを用いた解析により、実構造物では測定不可能な鉄筋内部を流れるマクロセル電流の方向性を評価できることがわかった。その結果、断面修復部に形成するマクロセルにおけるアノード部とカソード部を、判断することが可能であると思われる。

図-10に、全Type AおよびType B 供試体における、マクロセル電流密度の解析値と測定値の関係を示す。これによると、解析値と測定値では相違が認められ、現段階ではモデルを用いたマクロセル電流密度の定量的な評価は難しいと言える。

4. 2 曲げひび割れ部に対する検討

図-11および図-12に、Type C 供試体を用いた、マクロセル電流密度の分布形状を示す。水セメント比は50%であり、ひび割れ幅は 0.3 mm である。これによると、解析値および測定値はいずれも、塩化物イオンが最も早期に鉄筋表面に浸透すると思われる曲げひび割れ位置でアノード電流

が発生し、その他の健全なかぶりコンクリート内部の鉄筋では、カソード電流が発生することが確認できる。つまり、解析値と測定値の分布形状は等しく、正負の符号はいずれの鉄筋位置においても一致することが認められる。したがって、本モデルを用いた解析により、実構造物では測定不可能な鉄筋内部を流れるマクロセル電流の方向性を評価できることがわかった。その結果、曲げひび割れ部に形成するマクロセルにおけるアノード部とカソード部を、判断することが可能であると思われる。

図-13に、全Type C供試体における、マクロセル電流密度の解析値と測定値の関係を示す。これによると、解析値と測定値では相違が認められる。したがって、現段階ではモデルを用いたマクロセル電流密度の定量的な評価は難しい。

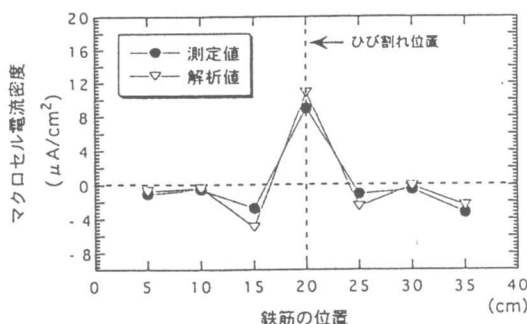


図-11 マクロセル電流密度の分布形状
(Type C 例1)

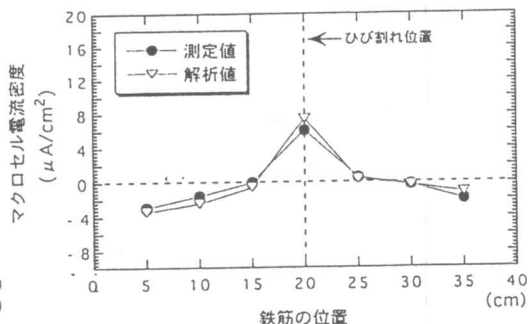


図-12 マクロセル電流密度の分布形状
(Type C 例2)

5. 結論

断面修復部および曲げひび割れ部に形成するマクロセルを、電気化学的なモデルに置き換え、その腐食速度の推定を行った。モデルでは、自然電位法により測定した鉄筋の電位、交流インピーダンス法により測定した分極抵抗およびコンクリートの比抵抗を代入することにより、マクロセル電流が推定される。本研究の結果、モデルにより、マクロセル電流密度の分布形状を把握することが出来ることがわかった。したがって、マクロセルのアノード部およびカソード部を判断することが可能である。

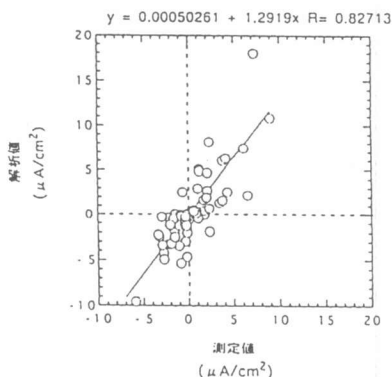


図-13 解析値と測定値の比較

参考文献

- [1] 出村克宣ほか：補修後5年を経過した鉄筋コンクリート造建物の鉄筋腐食、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，pp.29-32、1994.10
- [2] 竹田宣典ほか：海洋曝露試験に基づく各種コンクリートの塩分浸透量の推定、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.595-600、1991.6
- [3] 下澤和幸ほか：埋設ミニセンサーによる鉄筋腐食モニタリング、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.813-818、1996.6