

塩害の影響を受ける鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案

金沢工業大学大学院 工学研究科
金沢工業大学 環境・建築学部
鹿島建設（株） 技術研究所
鹿島建設（株） 技術研究所

学生会員 ○長谷川裕介
正会員 宮里心一
非会員 親本俊憲
正会員 横関康祐

1. はじめに

多くの鉄筋コンクリート部材は、重要な社会基盤に用いられる。そのため、安全で快適に供用されなければならない。ただし、広範囲への社会貢献を施すためには、厳しい環境条件下に暴露される鉄筋コンクリート構造物もある。この場合、特にひび割れ部では、塩害により鉄筋腐食が生じている部材もある。ここで、性能規定型設計においては、このような劣化も考慮して、長期にわたる部材性能を照査する必要がある。しかしながら、曲げひび割れなどの欠陥を有する部材を対象として、進展期に対するマクロセル腐食速度を解析するモデルは未だ十分に検討されていない。

以上の背景を踏まえ著者らは、主にひび割れ等の欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる塩化物腐食の速度を予測する基本モデルを図1の流れで構築している。その一環として本研究では、表1に示すとおり、図1中の2重線の因子をInput Dataとし、腐食速度をOutput Dataとするモデルを提案する。

2. モデルの構築

2.1 鉄筋要素の設定

マクロセル腐食速度とマイクロセル腐食速度を区別して解析するため、鉄筋を要素に分割する¹⁾。すなわち、図2に示すとおり、一本の鉄筋は、複数の鉄筋要素の連続体として考える。また、アノードとカソードが、単一の鉄筋要素内に存在する場合を「マイクロセル」とし、一方異なる鉄筋要素に跨る場合を「マクロセル」とする。

2.2 分極曲線の組合せによる腐食電流の解析方法

アノード・カソード分極曲線とマクロセル腐食電流およびマイクロセル腐食電流の関係を、図3にて説明する。なお、ここで代入する分極曲線は、測定時に生じるIRドロップを考慮し、鉄筋表面で反応する分極特性に起因する値を与えた。

(a)図に示すとおり、位置的要因により、塩化物イオンや酸素の供給条件が異なるため、鉄筋要素と鉄筋要素で

は、分極曲線の傾きが変化する。さらに、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点が電気化学的な平衡状態であり、この電流値で腐食は進行する。したがって、(b)図に示すとおり、同一鉄筋要素内のマイクロセル電流が解析される。一方、(c)図に示すとおり、異なる鉄筋要素に跨ってアノードとカソードが形成されるマクロセルの場合、鉄筋要素間のコンクリート抵抗や分極抵抗に伴う電位ロスを考慮する必要がある。なお、以上の方法で算定された腐食電流について、鉄筋要素*i*をカソードとし、鉄筋要素*j*をアノードとする場合を、 $I_{1(i,j)}$ とする。

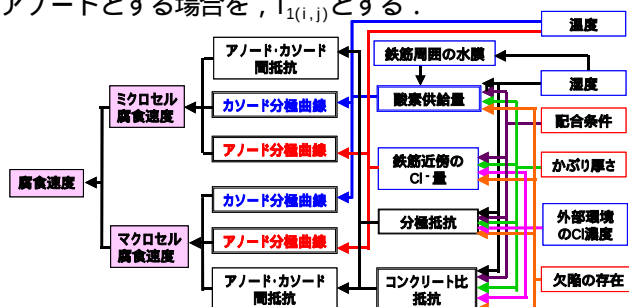


図1 腐食速度に影響を及ぼす因子の関係

表1 Input DataとOutput Data

Input Data	Output Data
アノード分極曲線 カソード分極曲線 コンクリート抵抗 分極抵抗 酸素供給量	腐食速度

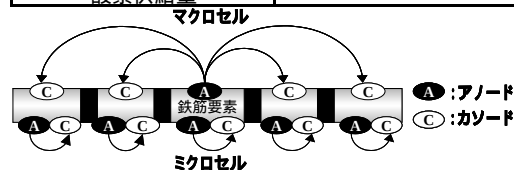


図2 鉄筋の要素分割

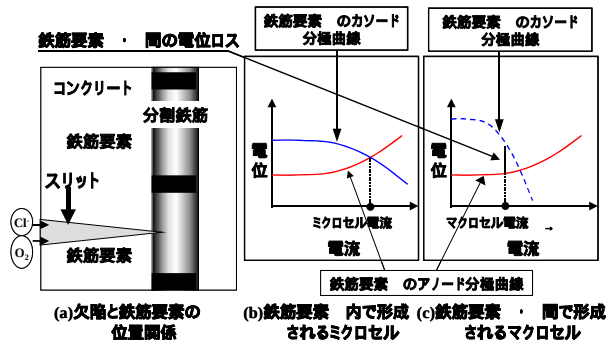


図3 分極曲線と腐食電流の関係

キーワード：塩害、腐食速度解析モデル、分極曲線、マクロセル、マイクロセル

連絡先：〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1 TEL 076-248-1305 FAX 076-294-6713

2.3 酸素供給量を考慮したカソード電流の制御方法

任意の鉄筋要素に供給される酸素量を考慮して、カソード電流の最大値を制限した。すなわち、次式に示すとおり、鉄筋要素 i がカソードとなる腐食セルにおいて、ミクロセルおよび複数のマクロセルに対する全カソード電流の和を制限した。

$$\alpha \times \left(\sum_{j=1}^n I_{1(i,j)} \right) \leq J_i \times 4 \times 96500 \quad (1)$$

α : 減衰係数 ($0 < \alpha < 1$),
 J_i : 要素 i への酸素供給量 ($\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

2.4 鉄筋要素間抵抗を考慮した腐食電流の分配方法

オームの法則によれば、並列回路が存在する場合、各回路の電気抵抗に反比例して電流は流れる。このことからミクロセルやマクロセルなどの複数の回路が存在する場合、各回路のアノードとカソード間の電気抵抗の逆数に比例して、カソード電流を分配した。

$$I_{2(i,j)} = \frac{\frac{1}{R_{i,j}} \times \alpha \times \left(\sum_{j=1}^n I_{1(i,j)} \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{i,j}}} \quad (2)$$

$R_{i,j}$: 要素 i から j 間の抵抗,
 $I_{2(i,j)}$: 要素 i から j 間のカソード電流

3. 検証実験

3.1 実験概要

供試体の概要を図4に示す。図2に示すとおり、鉄筋軸方向に要素分割された腐食電流の解析値と、実験により測定された実測値を直接比較するため、分割鉄筋¹⁾を埋設した。また、28日間の初期養生後、49日間の塩害促進暴露（3%あるいは15%の食塩水噴霧に1日間 + RH60%あるいはRH90%乾燥気中に2.5日間）を行った。また供試体は、ひび割れを模擬したスリットを導入した供試体および導入しない供試体を作製した。すなわち本研究では、表2に示す5ケースを対象として実験値と解析値を比較とした。

3.2 解析の例

ケース3の解析例を示す。先ず図5に示す通り、前述の鉄筋要素毎のアノード分極曲線とカソード分極曲線の重ね合わせを行った。次に表3に示すとおり、文献²⁾に基づく酸素供給量より算出した最大カソード電流を考慮した。最後に、分極抵抗とモルタル抵抗を考慮し、カソード電流を再分配し、腐食電流を求めた。

結果を図6に示す。ここでは、同様の手法で解析したケース1の結果も記す。これによれば、スリットの存在により腐食電流密度が高くなることが確認される。このことは、既往の実験や調査による知見と同様である。

3.3 解析結果と実験結果の比較

図7に全5ケースにおける解析値と実測値の関係を示す。

これによれば、ケース4の結果を除けば、解析値と実測値はほぼ同等であり、本モデルの妥当性が明らかとなった。

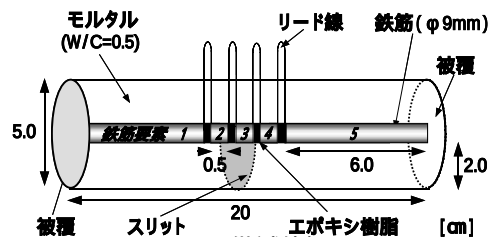


図4 供試体概要

表2 実験ケース

実験ケース	1	2	3	4	5
ひび割れ幅(mm)	無し	0.2mm		0.4mm	
食塩水濃度(%)		3%		15%	3%
湿度RH(%)			90%		60%

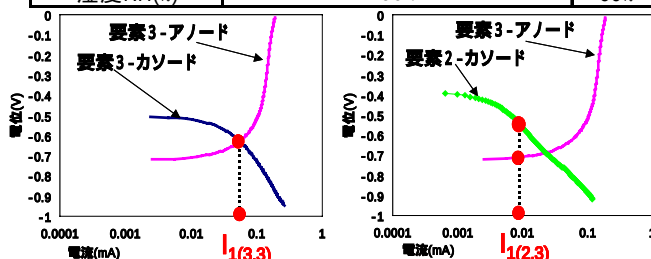


図5 分極曲線の組み合わせ

表3 最大カソード電流

	鉄筋要素				
	1	2	3 (ひび割れ部)	4	5
最大カソード電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	523.60	43.63	436.3344	43.63	523.60

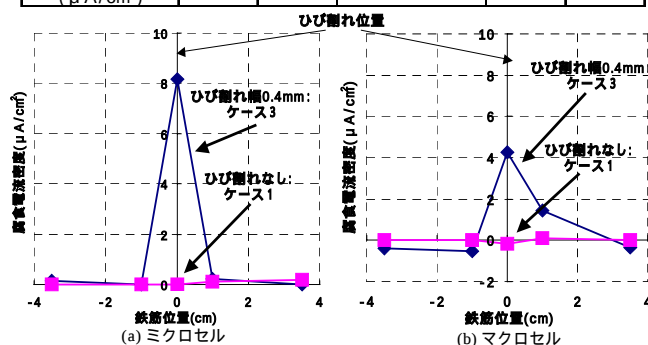


図6 解析値の比較

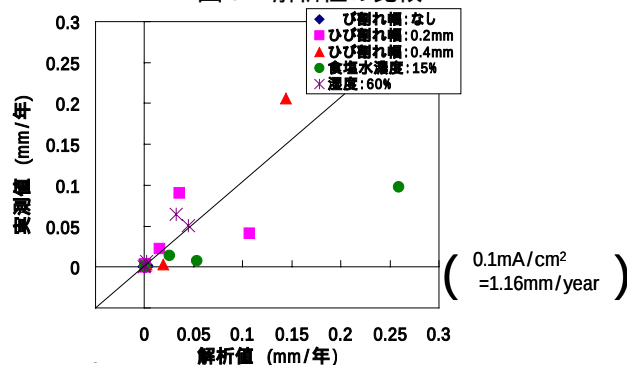


図7 解析値と実験値

【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, pp. 547-552 (2001)
- 2) 松村卓郎, 宮川豊章, 小林和夫, コンクリートの酸透過性に関する基礎的研究, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, pp. 258-259 (1988)