

マイクロセルおよびマクロセル腐食の統合的評価手法に関する解析的研究

中央大学 学生会員 ○内野 洋平

中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

コンクリート内部は強いアルカリ性を示し、鉄筋は表面に酸化被膜（不動態）を生成することにより、健全な状態に保たれている。しかしながら、塩化物イオン等の腐食因子が到達することにより不動態皮膜が消失し、局所的な腐食が生じる。これは構造性能および耐久性能を大幅に低下させるため、RC 構造物の維持管理を行う上で、この現象を適切に把握することが重要な位置付けにある。

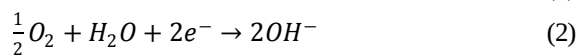
本研究は、実現に近い条件下で生じる鉄筋腐食量の定量的評価を目的とし、塩化物イオンによる pH 低下を基に、孔食電位低下がマイクロセルおよびマクロセル腐食に与える影響を加味した電気化学モデルを構築した。

2. 鉄筋腐食量の予測手法

本研究は塩化物イオンによる pH の低下を評価し、マイクロセル電位および電流を算出した後、マイクロセル腐食の発生に伴って生じるマクロセル電流を算出することで総電流量の解析を行う。2.1 節は、塩化物イオンを考慮したマイクロセル電流の算出は久保ら¹⁾の研究結果を用い、2.2 節は宮里ら²⁾による分極抵抗およびコンクリート抵抗を考慮したマクロセル回路モデルを適用した。

2.1 ミクロセル腐食

コンクリート内部の鉄筋腐食は、アノード、カソードの電気化学的反応によるものであり、式(1)に表すアノード反応、中性環境では式(2)、酸性環境では式(3)に表すカソード反応がそれぞれ進行する。



また、各反応における電極電位は Nernst 式より、式(4)、式(5)および(6)で表される。

$$E_{Fe} = -0.440 + 0.0295 \log \beta_0 - 0.059pH + 0.344 - 0.4664 \ln [Cl^-] - 1.198 \left(\beta_0 = \frac{1}{1+k_1 \cdot [Cl^-] + k_1 \cdot k_2 \cdot [Cl^-]^2} \right) \quad (4)$$

$$E_{O_2} = 0.40 + 0.0148 \log (P_{O_2}) - 0.059pH \quad (5)$$

$$E_{H_2} = -0.059pH \quad (6)$$

式(6)は鉄錯体および孔食電位低下を考慮したアノード電位（孔食電位）であり、 Cl^- と pH の影響を受ける。

また、アノード反応、カソード反応は Tafel 式（反応電位式）により電流で表される。それぞれを式(7)、式(8)に示す。

$$i_a = i_a^0 \cdot [\alpha_a (E - E_a)] \quad (7)$$

$$i_c = i_c^0 \cdot [-\alpha_c (E - E_c)] \quad (8)$$

また、アノード分極曲線およびカソード分極曲線の交点において腐食は生じ、その交点における電流である腐食電流 i_{corr} を、式(9)に示す。

$$i_{corr} = \exp \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_c} \right)} \left\{ (E_c - E_a) + \frac{1}{\alpha_a} \ln i_a^0 + \frac{1}{\alpha_c} \ln i_c^0 \right\} \right] \quad (9)$$

同式はアノード電位が卑かつ、カソード電位が貴である酸性環境の場合のみに適用可能である。しかしながら、中性環境におけるアノード電位は非常に貴であるため、理論上、式(9)を用いることは困難である。ここで、 Cl^- 濃度によるアノード曲線の遷移を図-1 に示す。中性環境下、すなわち少量の Cl^- が浸入した場合は、腐食時にアノード曲線とカソード曲線が不動態域で交わるため、腐食電位は不動態電位 E_{pass} と表される。また、アノード反応は不動態皮膜の影響によって滞り、反応がそれ以上進むことはない。この際の反応速度を不動態電流 i_{pass} と表す。カソード反応もアノードと同様に i_{pass} で進行するため、これがマイクロセル電流となる。

2.2 マクロセル腐食

本モデルは図-2 に示すように、鉄筋、コンクリートおよび不動態の 3 要素 12 節点によって構成されており、鉄筋には奇数、コンクリートには偶数の節点番号をそれぞれ設定した。また、鉄筋要素が腐食条件を満たし、点 1, 3 および 5 が中性、点 7, 9 および 11 が酸性となるように Cl^- を与えた。なお、分極抵抗 R_p 、コンクリート抵抗 R_c については明確な定義がされていないため、小林ら³⁾の実験による実測値を用いた。

キーワード 塩化物イオン, pH, 孔食電位, ミクロセル腐食, マクロセル腐食

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 理工学部 都市環境学科 TEL 03-3817-1892

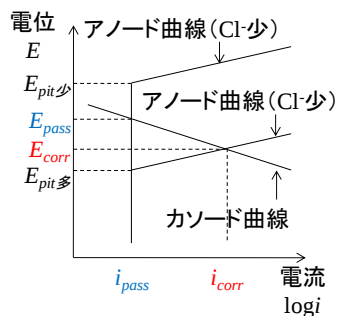


図-1 アノード曲線の遷移

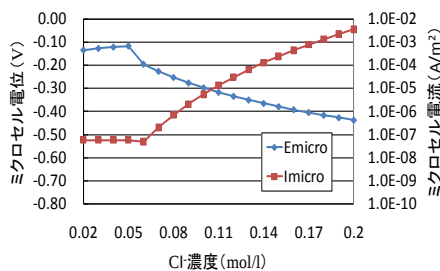


図-3 ミクロセル電流・電位

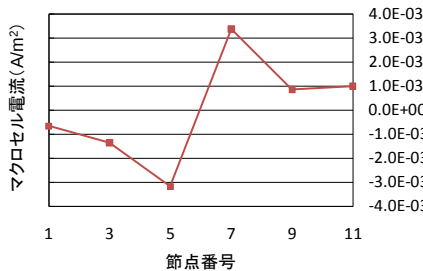


図-4 マクロセル電流

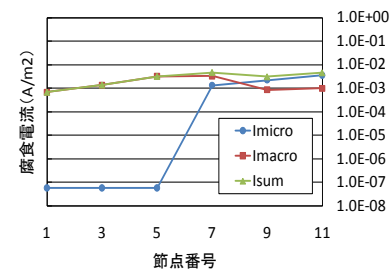


図-5 総電流量

マクロセル電流量の算出には、コンクリート要素に Kirchhoff の第一法則を用いた。これらの連立方程式を解くことにより、マクロセル電流の算出が可能となる。

2.3 ミクロセルおよびマクロセルの関連性と統合

コンクリート内部でマクロセル腐食が発生すると、鉄筋は孔食を引き起こす。これは、部材中の同一鉄筋内の電位差により起こるものであり、塩化物イオンの浸入による電位低下が大きく影響を及ぼす。

2.2 節に示したように、ミクロセル腐食は鉄筋の中性部および酸性部において発生し、これらは同一鉄筋内に共存している。また、それぞれの反応形態は異なるため、反応電位にも差異が生じる。特に、酸性環境下における腐食は孔食電位が著しく低下するため、中性部との差異を生じさせる要因となる。したがって、同一部材内に共存する酸性部および中性部が電氣的に接続されることから、マクロセル腐食回路を形成するといえる。

3. 本モデルの適用性評価

図-3 に塩化物イオンの増加に伴うミクロセル電流および電位の分布を示す。腐食開始直後の Cl 濃度における電流は一定値となり、Cl 濃度 0.06 以降は上昇する傾向を示した。一方、ミクロセル腐食電位は Cl 濃度 0.06 までは緩やかに上昇し、それ以降は下降傾向を示している。したがって、腐食環境は Cl 濃度 0.06 を境界とし、それを下回る場合は中性環境、上回る場合は酸性環境におけるミクロセル腐食が確認できた。

図-4 にマクロセル電流分布を示す。ここで、鉄筋要

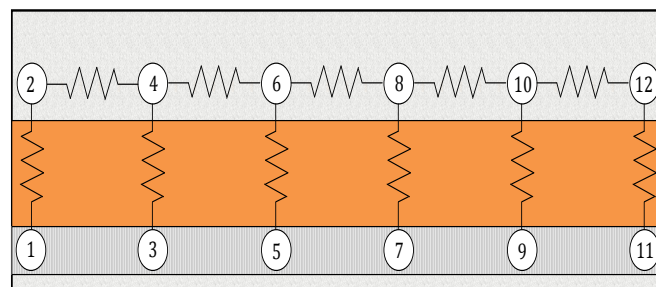


図-2 マクロセルモデル

素への流出入を区別するため、アノード電流を正、カソード電流を負に対応させた。同図より、点 5～7 間に正負の境界が確認できたため、点 1～5 がアノード、点 7～11 がカソードとなるマクロセル腐食が生じると考えられる。

図-5 に鉄筋要素におけるミクロセル電流量、マクロセル電流量および総電流量を示す。ミクロセル電流は点 7～11 間において顕著に表れている。一方、マクロセル電流は点 5～7 間において顕著であるため、ミクロセルおよびマクロセル回路の形成される領域が異なることが示された。したがって、ミクロセル腐食、マクロセル腐食は同一部材内において同時に進行する状態であり、かつ互いに影響を及ぼすことが確認された。

4. まとめ

本研究は、塩化物イオンによるミクロセル・マクロセル回路中のアノード・カソード電位および電流、双方の評価を同時に可能となるモデルの構築を行った。

【参考文献】

- 1) 久保貴博, 大下英吉: 塩化物イオンを考慮した鉄筋腐食メカニズムに関する解析的研究, 第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-052, No.5, pp.52, 2006.3
- 2) 宮里心一, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, 第 12 巻, 第 2 号, 2001.5
- 3) 小林孝一, 宮川豊章: 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, 173-186, 2001.2