

マクロセル腐食解析を用いた補修設計手法の検討

新潟大学大学院自然科学研究科 ○学生会員 佐藤洋也
 新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 清水開
 新潟大学工学部 正会員 佐伯竜彦
 新潟大学工学部 正会員 斎藤豪

1. はじめに

塩害で劣化したコンクリート構造物の補修では、断面修復が行われることが多い。しかし、劣化したコンクリートを部分的に取り除き、補修材料を打ち継ぐ断面修復工法の場合、補修部と母材部の塩化物イオンの含有量が異なることによるマクロセル腐食の進行が問題となっている。マイクロセル腐食は鉄筋全体において均一に腐食が進行するのに対し、マクロセル腐食は局所的に腐食が進行するため、腐食速度が大きく危険性の高い腐食とされている。したがって、マクロセル腐食劣化を最小限に抑えたいうえで経済的な補修を行うことが求められている。

コンクリート内部の含水率は、降水量、湿度及び気温などの環境条件によって変化する。含水率の変化によって、塩化物イオン拡散係数及び電気抵抗も変化し、マクロセル腐食に影響を及ぼすことが知られている。このため、これらの環境条件によって、最適な補修条件は異なる可能性がある。したがって、塩害劣化構造物に対し、環境条件を考慮した最適な補修条件を選定する補修設計手法の提案を最終目的とし、本研究では、気温を除く降水量及び湿度に着目した環境条件を考慮するマクロセル腐食解析を構築し、様々な補修条件のシミュレーションを可能とするツールの作成を行った。

2. 腐食解析モデル

腐食解析では、まず、既設コンクリート及び断面修復部の相対含水率を求め、それを元に腐食パラメータとなる塩化物イオン濃度や比抵抗を求めた。次に、それら腐食パラメータと既往の研究から参考にした以下の式(1)を用いて、要素ごとのマイクロセル腐食電流密度及びマイクロセル腐食電位を算出したのち、マクロセル腐食電流密度を算出した。

$$E_c = \beta_c \times \log_{10} \left(\frac{i_c}{i_{co}} \right) + E_{co} \quad (1)$$

$$E_a = \beta_a \times \log_{10} \left(\frac{i_a}{i_{pass}} \right) + E_{plt} \quad (2)$$

$$E_c - E_a = \Delta E_{c-a} = (L \times \rho_{con}) i_{ca} \quad (3)$$

ここに、 E_c, E_a : 内部カソード分極曲線上の自然電位(V) β_c, β_a : 内部分極曲線上のターフェル勾配(V/decade) i_c, i_a : 内部分極曲線上の電流密度(A/cm²) i_{co} : 交換電流密度(A/cm²) E_{co} : 内部カソード反応の平衡電位(V) i_{pass} : 不働態電流密度(A/cm²) E_{plt} : 孔食電位(V) L : 要素間の距離(cm) ρ_{con} : コンクリート見かけの比抵抗($\Omega \cdot \text{cm}$) i_{ca} : 要素間の電流密度(A/cm²)

そして、算出したマイクロセル腐食電流密度とマクロセル腐食電流密度の和を腐食量すなわち腐食電流密度とした。腐食解析理論と腐食パラメータ算出方法について下記に示す。

2.1 腐食解析理論

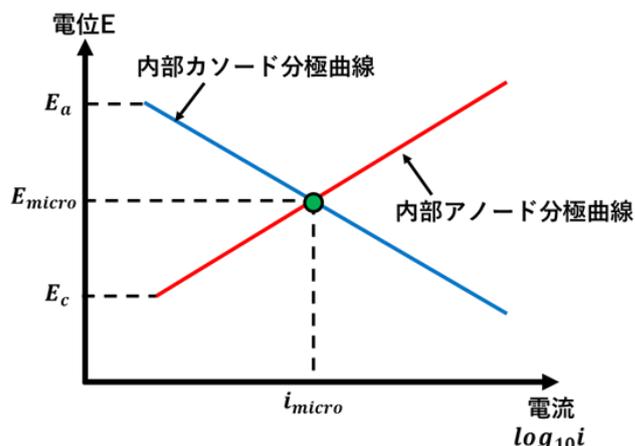


図-1 ミクロセル腐食を表した内部分極曲線

(1) ミクロセル腐食

マイクロセル腐食電流密度及びマイクロセル腐食電位の算出には式(1)、式(2)を用いる。式(1)は内部カソード分極曲線、式(2)は内部アノード分極曲線を表したものである。なお、図-1では任意の鉄筋要素の内部分極曲線を想定しており、式(1)、式(2)の交点がマイクロセル腐食となる。したがって、交点における電流密度がマイクロセル腐食電

流密度 i_{micro} , 電位がマイクロセル腐食電位 E_{micro} となる.

(2)マクロセル腐食

マクロセル腐食はマイクロセル腐食とは違い, 電気回路が大きい腐食であるため式(1), 式(2)に加えて, コンクリート抵抗による電位差を表した式(3)を考慮した. また, 図-2 では任意の要素 C, A の内部分極曲線を想定し, 要素Cをカソード要素 c , 要素Aをアノード要素 a とする. それぞれの要素のマイクロセル腐食電流密度 $i_{micro,C}$, $i_{micro,A}$ 及びマイクロセル腐食電位 $E_{micro,C}$, $E_{micro,A}$ から式(4), 式(5)そして式(6)を示す. これを解くことによりマクロセル腐食電流密度 i_{macro} を算出できる. さらに, マクロセル腐食におけるアノードとカソードの面積比の影響を考慮するため, 式(7)のようにカソード要素とアノード要素の面積比と, 同一面積条件下で算定される一対のカソード要素とアノード要素間におけるマクロセル腐食電流密度 $i_{macro,C-Ai}$ を関数とした分配率を用いた.

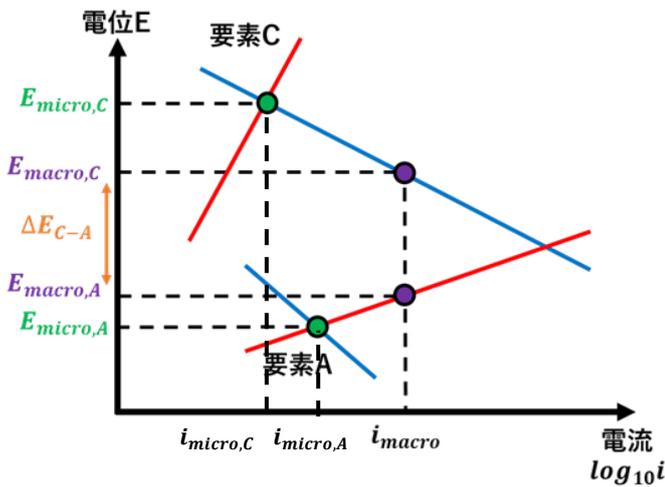


図-2 マクロセル腐食を表した内部分極曲線

$$E_{macro,C} = \beta_c \times \log_{10} \left(\frac{i_{macro}}{i_{micro,C}} \right) + E_{micro,A} \quad (4)$$

$$E_{macro,A} = \beta_a \times \log_{10} \left(\frac{i_{macro}}{i_{micro,A}} \right) + E_{micro,C} \quad (5)$$

$$\Delta E_{C-A} = E_{macro,C} - E_{macro,A} = (L_{A-C} \times \rho_{con}) i_{macro} \quad (6)$$

$$\beta_{C-Ai} = \frac{S_C \cdot i_{macro,C-Ai}}{\sum_{j=1}^n S_{Aj} \cdot i_{macro,C-Aj}} \quad (7)$$

ここに, $E_{macro,C}$, $E_{macro,A}$:要素 C, A におけるマクロセル腐食電位(V) $E_{micro,C}$, $E_{micro,A}$:要素 C, A におけるマイクロセル腐食電位(V) i_{macro} :マクロセル腐食電流密度(A/cm²) $i_{micro,C}$, $i_{micro,A}$:要素 C, A におけるマイクロセル腐食電流密度(A/cm²) β_{C-Ai} :要素 C-Ai 間のマクロセル腐食電流密度の分配率 S_C :要素

C の表面積(cm²) S_A :要素 A の表面積(cm²)

2. 2 腐食パラメータ

上記の腐食解析を行うために必要な腐食パラメータの算出方法について, 下記に示す.

(1)相対含水率

マクロセル腐食解析には, コンクリート内の乾燥過程及び吸水過程における相対含水率の時間変化を求める必要がある. 水分拡散試験によって, 相対含水率 100%における水分拡散係数を算出した²⁾. さらに, 既往の研究を参考に相対含水率と水分拡散係数の関係を求め, フィックの第二法則により, 相対含水率の時間変化を求めた²⁾.

(2)塩化物イオン濃度

コンクリートの含水率と塩化物イオン拡散係数の関係は定式化されている³⁾. そこで, 塩分拡散試験を行い, 飽水状態の塩分拡散係数を求めた. そして, フィックの第二法則を用いて, 塩分濃度の時間変化を求めた.

(3)比抵抗

コンクリートの含水率は, コンクリート抵抗に影響を及ぼすことが知られている. そこでΦ5cm×10cmの円柱供試体に電極を埋め込み, 真空飽和处理を行った後に乾燥させた. その間経時的に供試体質量とコンクリート抵抗を計測することによって, 相対含水率と比抵抗の関係式を求めた.

3. 解析モデルの妥当性の確認

構築したマクロセル腐食解析モデルの妥当性を確かめるため, 宮里らの分割鉄筋供試体を用いた室内実験⁴⁾と渡部らの屋外実験⁵⁾の実験値との比較を行った.

3.1 屋内実験

宮里らが屋内実験で使用した供試体の概要を図-3に示す. 供試体は, side-A側がW/C=50%, Cl⁻=15.0(kg/m³)の母材部, side-B側がW/C=50%, Cl⁻=0.5(kg/m³)の補修材部である. また, マクロセル腐食電流密度を測定するため鉄筋は6本に分割され, 相対湿度80%室温20°Cの環境中に91日間暴露した. 分配率に必要なアノード及びカソード要素の面積は, 1つの要素につき, 分割鉄筋1本の表面積を仮定した. 暴露後の鉄筋要素別の腐食電流密度と解析結果を図-4に示す.

図より, 実験値との傾向がつかめていることから, マク

ロセル腐食解析モデルが妥当であると判断した。

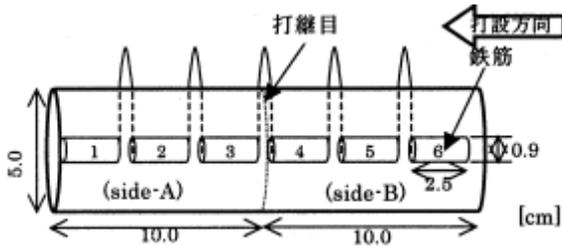


図-3 屋内実験の供試体の概要⁴⁾

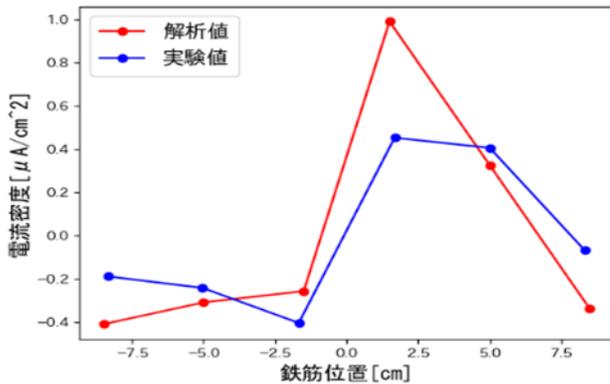


図-4 暴露 91 日後の要素別の腐食電流密度

3. 2 屋外実験

次に、より現実的な状況下での妥当性を確認するため、渡辺らの屋外実験結果との検証を行った。供試体の概要を図-5 に示す。母材部は普通ポルトランドセメントを用いた W/C=65%, Cl^- =2.4(kg/m³)のコンクリートであり、補修材部は Cl^- =0(kg/m³)のポリマーセメントモルタルである。また、上面の 1 面以外を水分や塩化物イオンの出入りを防ぐため、エポキシ樹脂による表面被覆を行っている。暴露は 2001 年 11 月から 2011 年 9 月までの約 10 年間に於いて、伊豆半島東海岸の伊豆海洋公園内で行われた。

乾湿繰り返しによる含水率変動を考慮するため、暴露地点における 1 時間ごとの降水情報を用いて水分移動解析を行った。なお、屋内実験と同様に鉄筋位置ごとの腐食電流密度を求めるため、図-6 のように鉄筋要素を均等に 7 つに分けて解析計算を行った。分割鉄筋ではないため分配率に必要なアノード要素とカソード要素の面積は腐食面積をアノード面積と仮定した。

暴露 10 年経過後の鉄筋腐食状況をトレースした結果と鉄筋要素別の腐食電流密度を図-7 に示す。解析値では、全面補修(No.1)は腐食がどの鉄筋位置においても発生しない結果となった。また、部分補修(No.2)は母材部から補修部に近づくほど腐食量は大きく、打継目近傍の腐食量が 1 番大きい結果となり、補修材部は腐食が発

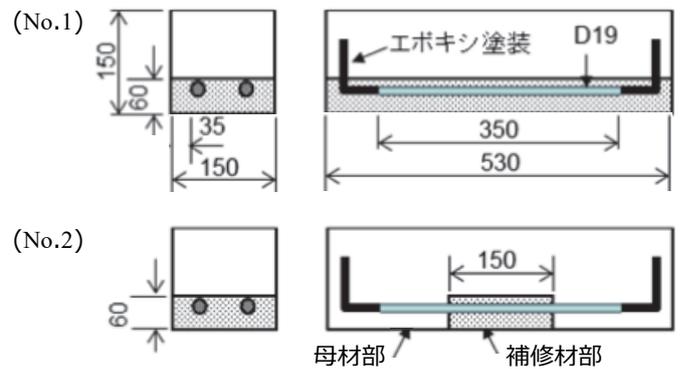


図-5 屋外実験の供試体の概要⁵⁾

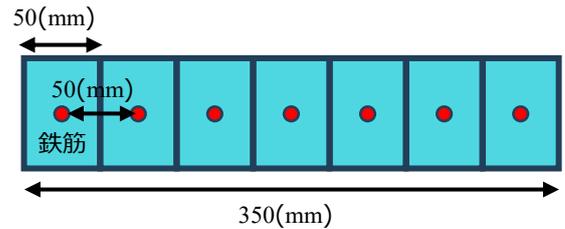


図-6 解析計算での鉄筋位置

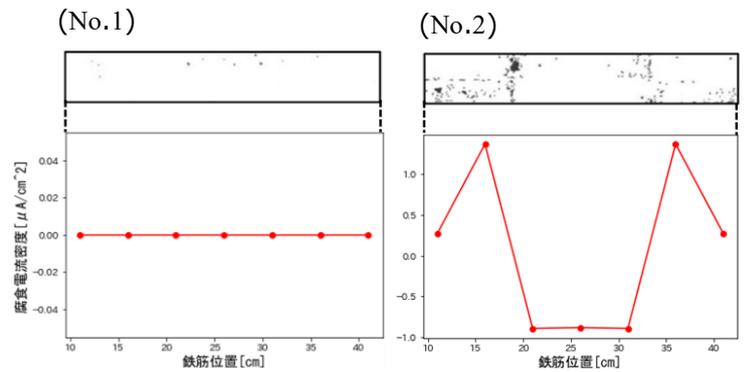


図-7 鉄筋腐食の展開図及び腐食電流密度の解析結果⁵⁾

生しない結果となった。腐食量の大きい位置に多少の違いはあるが、これは解析におけるメッシュの大きさの影響と考えられる。したがって、実験値との傾向がつかめていることから、乾湿繰り返しを考慮した現実的な環境においても再現できると判断した。

4. 補修シミュレーションの結果

次に、屋外実験の供試体を参考に、補修シミュレーションを行うため仮定した供試体内部塩分量を図-8 に示す。供試体の形状・寸法、暴露条件及び暴露年数は渡辺らと同様にした。なお、鉄筋周辺の塩分量は両端から中央部分に向かって増加するよう設定した。

3 種類の補修パターンでその後の腐食電流密度について解析シミュレーションを行った。アノード要素面積は 3. 2 と同様にし、カソード要素面積は補修範囲に応じ

て分配率を設定した。補修パターンの概要及び腐食電流密度の解析結果を図-9 に示す。

3 種類の解析結果から、どの補修パターンも打継目近傍の母材部の腐食電流密度が大きいことが分かる。また、その部分の腐食電流密度に着目すると、補修範囲が大きいパターンは腐食電流密度が1番小さく、補修範囲が小さいパターンは腐食電流密度が1番大きいことが分かる。これは補修範囲が増加することでアノード要素に対するカソード要素面積が大きくなる影響以上にアノード要素における塩分量の影響が大きいことが原因であると考えられる。このシミュレーションにより、腐食劣化周辺において塩分量が不均一の中、どの範囲を補修すればマクロセル腐食の発生すなわち再劣化を最小限に抑えられるか再現できることを確認した。

5. まとめ

- (1) 短期間暴露の屋内実験及び長期間暴露の屋外実験どちらにおいてもマクロセル腐食解析モデルの妥当性を確認できた。
- (2) 不均一な塩分量を設定した供試体において様々な補修パターンのシミュレーションにより、塩分量の分布を踏まえたうえで断面修復範囲の影響を評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 鈴木三馨・福浦尚之・丸屋剛:塩害による腐食劣化予測に対する構造・鋼材腐食連成解析手法の構築, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.3, 301-319, 2014
- 2) 秋田宏・藤原忠司・尾坂芳夫:乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集 No.490/V-23, pp.101-110, 1994.5
- 3) 佐伯竜彦・二木央:不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18 No.1, 1996
- 4) 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) 渡部正・松林裕二・星野富夫・岸利治:部分断面修復工法で補修した鉄筋コンクリート部材の鉄筋腐食性状に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.3, 281-294, 2013

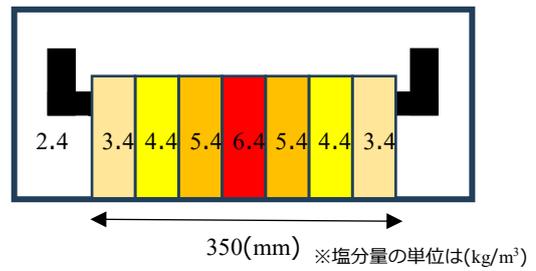


図-8 供試体内部塩分量

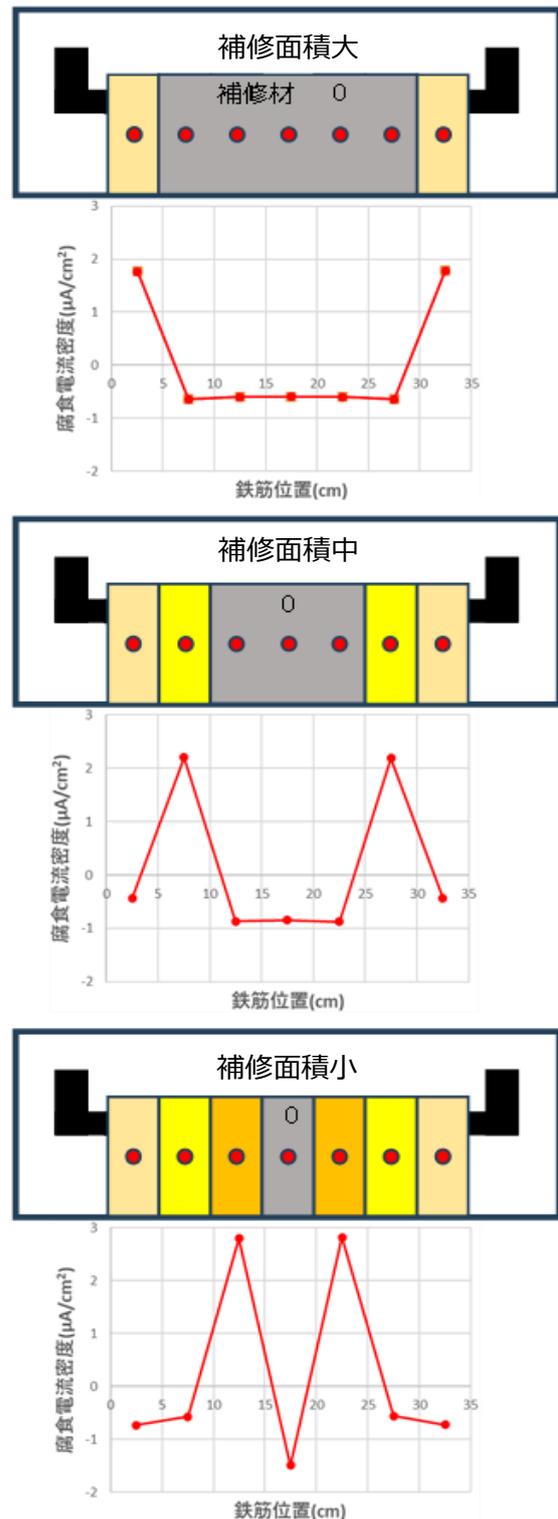


図-9 補修パターンの概要及び腐食電流密度の解析結果