

分極特性を考慮したコンクリート中の鉄筋腐食モデルに関する研究

愛媛大学 学生会員 ○深川大輔 西日本旅客鉄道 非会員 杉野和可子
愛媛大学大学院 正会員 河合 慶有 愛媛大学大学院 正会員 氏家勲

1. はじめに

塩害環境下では塩化物イオンが限界値に達すると、不動態被膜が破壊されコンクリート中の鉄筋が腐食する。コンクリート中の鉄筋腐食は水と酸素を消費して電気化学的反応により進行する。この時、鉄筋表面では鉄がイオン化するアノード反応と酸素が還元するカソード反応が生じ、セルという腐食電池が形成される。コンクリート中の鉄筋腐食はアノード・カソード部の位置関係を考慮して、マクロセル腐食とミクロセル腐食の2つの腐食形態に分けられる。特に塩害環境下にあるコンクリート構造物では、外部から供給される塩化物イオン濃度分布が不均一な場合、塩化物イオン濃度が高い部位でアノード反応、これ以外の部位ではカソード反応となるマクロセル腐食が生じる。また、鉄筋腐食性状は、原理的にアノード・カソード分極曲線といった内部分極曲線によって決定される。特にカソード分極特性は、律速条件に基づき過電圧の大きさによって3つの領域に分けられることが知られている。過電圧が低～中程度の場合、電流密度と電位の関係はバトラー・ボルマー式から導出される Tafel 式により近似される。また、電極反応をバトラー・ボルマー式および Tafel 式により近似し、FEM 解析の境界条件として設定することで鉄筋に流出入する電流密度を数値解析により求める方法が提案されている¹⁾。本研究では、アノード部・カソード部が特定されている鉄筋コンクリート供試体を対象として、マクロセル腐食に影響する要因について分極特性の観点から実験的・解析的検討を行った。また、分極特性に基づく理論モデルを境界条件としたマクロセル腐食解析を対象として、実測値に基づき適切な境界条件の設定方法について検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、水セメント比を 55%、細骨材率を 48% として配合を作製した。図 1 に本研究で作製した供試体を示す。供試体寸法は、断面 100×100mm、長さ 500mm とし、埋設した分割鉄筋（図 2）は長さ 100mm の丸鋼φ22 を切断面の垂直方向に 2 分割しエポキシ樹脂で接着し作製した。各鉄筋要素のリード線を結合した状態では電氣的に 1 本の鉄筋とみなすことができる。なお、かぶりは 20、25、及び 30mm とした。打設後、脱型材齢 3 日、気中養生 28 日の条件で初期養生を施した。養生終了後に、各供試体には設定したかぶりを確保した面以外から腐食因子が侵入することを防ぐため、浸透面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆した。その後、20℃の恒温室内において塩水（濃度 10%）による湿潤期間 3 日と乾燥期間 4 日の 1 週間を 1 サイクルとした乾湿繰り返し試験（図 3）を行った。なお、1 サイクルごとの湿潤期間終了後に自然電位と分極抵抗（AC インピーダンス法）を測定した。また、材齢 182 日が経過した供試体を対象としてアノード・カソード分極試験（掃引速度：1mV/s、±1V vs. Ag/AgCl まで）、マクロセル電流密度（無抵抗電流計）を計測した。

3. 実験結果および考察

図 4 および図 5 に材齢 182 日におけるアノード・カソード分極曲線を示す。図 4 より、アノード分極曲線の Grade 判定²⁾から、かぶりが大きくなるほど不動態皮膜の健全性が相対的に保たれている（過電圧が中程度までは左側に位置している）ことが認められる。また、各鉄筋表面において測定された塩化物イオン含有

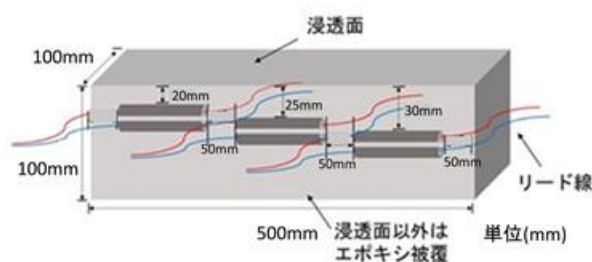


図 1 供試体の模式図

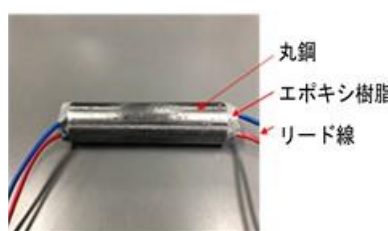


図 2 分割鉄筋概要



図 3 乾湿繰り返し装置

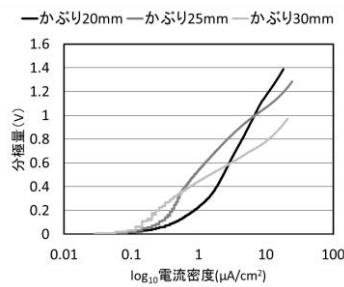


図4 アノード分極曲線

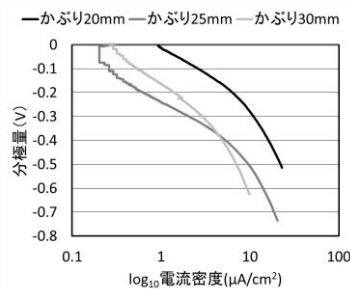


図5 カソード分極曲線

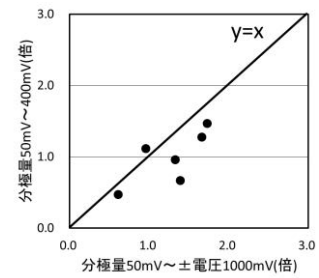


図6 分極量の違いによる

ターフェル勾配の文献値との比較

表1 パラメータ

かぶり(mm)	判定	ターフェル勾配(V)	交換電流密度(A/m²)
20上	カソード	0.338	4.425
20下	アノード	0.415	4.529
25上	カソード	0.221	0.456
25下	アノード	0.692	0.466
30上	カソード	0.454	0.328
30下	アノード	0.294	0.256

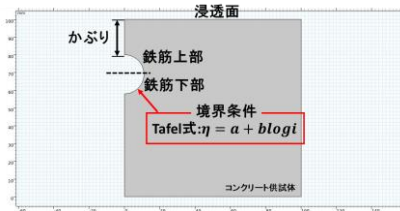


図7 2次元解析の1/2モデル

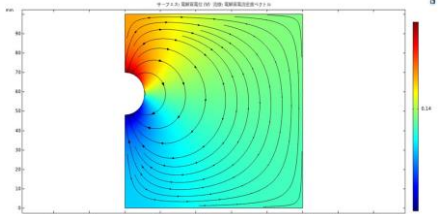


図8 解析結果例(20mm)

量はかぶりが大きくなるほど低くなっていたためアノード分極曲線は鉄筋表面の塩分濃度の影響が大きいことがわかる。図5より、カソード分極曲線においては、かぶりが大きくなるほど分極曲線が左側に位置しており酸素透過が抑制されていることがわかる。また、図4および図5より、分極量400mVまでの曲線の傾きに大きな違いが生じていることがわかった。

実測したアノード・カソード分極曲線に基づき、式(1)に示すターフェル式の勾配及び切片を推定した。

$$\eta = a + b \log i$$

(1)

ターフェル式のパラメータの推定では律速条件を考慮して過電圧が低～中程度の範囲を分極量50mV～400mVと設定することでターフェル勾配・切片を推定する方法を提案した。分極量の範囲を変化させて算出したターフェル勾配の文献値²⁾との比較結果を図6に示す。分極量を50mV～400mVまでに狭めることによって、計算値が文献値²⁾に近づくことが確認できた。

本研究では以上の実験結果を踏まえて、有限要素法を用いた数値解析を行った。解析モデルは、図7に示すように解析対象の対称性を考慮して2Dの1/2モデルとして、COMSOL Multiphysics ver.5.3aを用いて実施した。解析条件は、ラプラス方程式を支配方程式として、実測された電極電位及び電解質の導電率を初期値とした。表1にターフェル式を境界条件として解析を行った際のパラメータを示す。また図8に解析結果(電解質の電位分布・電流密度分布)の一例を示す。この結果より、マクロセル腐食の発生が確認されたかぶり20mm及び25mmの計算値はそれぞれ4.485μA/cm²及び0.759μA/cm²となり、実測値5.122μA/cm²及び1.137μA/cm²と比較して、過小評価していることがわかる。この原因として、実際のマクロセル腐食がコンクリート中の電気抵抗率の影響を受けることが挙げられる。今回の解析モデルに使用した電気抵抗率は、かぶり部の塩分浸透の影響を考慮しておらず、コンクリート内部において一様であると仮定し、平均値を使用しているため計算結果では実際のマクロセル腐食を過小評価している可能性が考えられる。さらに本検討では解析モデルを2Dとしたため、アノード・カソード部の腐食面積の分配率を考慮していない。したがって、塩分浸透状況に基づく導電率分布及び鉄筋腐食性状から適切な分配率の設定が今後の検討課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 太田翔, 三村典正, 鹿島篤志, 河野広隆: 貼付け型シート陽極により電気防食工法のFEM解析の適用性について, コンクリート構造物, 補修, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp995-996, 2017年10月
- 2) N. Otsuki, S. Nagataki, and K. Nakashita: Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, ACI Materials Journal, Vol. 89, pp. 587-592, 1992.