

カソード反応の酸素拡散律速を考慮したマクロセル腐食解析モデル

愛媛大学 賛助会員 日下部駿

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

コンクリート中鉄筋の腐食の発生原因として塩害が挙げられる。塩害は主に海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物に外部から塩化物イオンが侵入することで鉄筋が腐食する現象である。鉄筋腐食が発生すると、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進行し、セルという腐食電池が形成される。また、コンクリート中鉄筋の腐食はマクロセル腐食とマイクロセル腐食に大別される¹⁾。例えば、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量が部材位置によって異なるため、塩化物イオン濃度が高い部分でアノード反応が卓越し、それ以外の部分でカソード反応が生じることによりマクロセル回路が形成される。このとき、アノード・カソード間に生じる自然電位差を駆動力としてマクロセル電流がイオン伝導によりかぶりコンクリート中を流れる。そのため、自然電位差とコンクリートの電気抵抗率の相互関係がマクロセル電流の大小を決定づける重要な因子となる。またマクロセル回路が形成された場合、腐食反応速度はカソード反応で消費される酸素の供給量に依存する酸素拡散律速になると考えられる。以上のような背景から、本研究では、電気抵抗率及び酸素透過性の異なるコンクリートを対象として、電気化学的計測結果に基づくマクロセル腐食解析モデルを構築することを目的として検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び供試体概要

本研究では、セメントに普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）を使用した供試体（OPC）及び高炉スラグ微粉末（セメント質量置換 45%）を混和したコンクリート供試体（GGBS45）を作製した。なお、水結合材比は 55%とした。コンクリートの配合を表 1 に、使用した骨材の物性を表 2 にそれぞれ示す。なお、各供試体には塩化物イオン濃度 10kg/m^3 を予め練り混ぜている。供試体寸法は、断面 $100\times 150\text{mm}$ 、長さ 200mm とし、埋設した鉄筋は長さ 100mm の丸鋼 $\phi 22$ を使用した。図 1 のようにエポキシ樹脂で絶縁接続した分割鉄筋を型枠の上からたこ糸で吊るし、型枠底面からかぶり 20mm を確保した。打設から 24 時間後に脱型し、材齢 7 日まで水中養生、その後材齢 28 日まで気中養生を行った。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の腐食因子の侵入を防ぐため、曝露面以外の 5 面をエポキシ樹脂を用いて被覆した。

2.2 乾湿繰り返し実験と電気化学的計測方法

乾湿繰り返し実験は、 20°C の恒温室において塩水（濃度 10%）を用いて乾燥期間 4 日間、湿潤期間 3 日間として行った。マクロセル電流は無抵抗電流計を用いて計測し、鉄筋の表面積で除して電流密度を算出した。また電気抵抗率は別途作製した円柱供試体を対象として 4 プローブ法を用いて測定した。なお、プローブ間隔は 50mm とした。また、湿潤サイクル後に、腐食モニター、ポテンショスタットを用いて自然電位、及びアノード・カソード分極曲線を測定した。

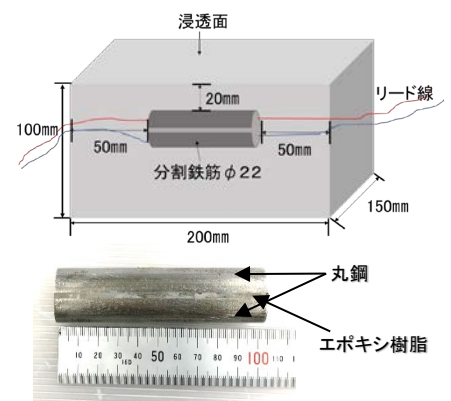


図 1 供試体概要

表 1 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m^3)				単体量(g/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	高炉スラグ微粉末	粗骨材		混和剤	
							G1	G2	高性能 AE減水剤	AE剤
OPC	55	49	165	300	895	—	468	468	2400	0.6
GGBS45			165	165	746	135	390	390	1800	0

表 2 骨材の物性

骨材	表乾面積 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	最大寸法 (mm)
砂岩砕砂 S1	2.61	1.2	2.7	15
砂岩砕石 G1	2.62	1.2		
砂岩砕石 G2	2.62	0.6	20	

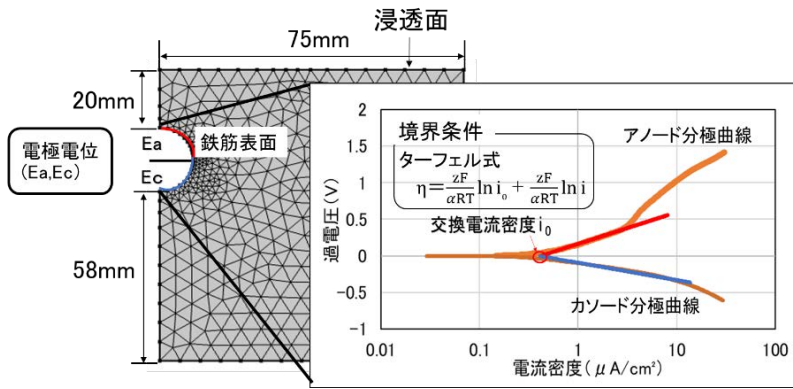


図2 腐食解析モデル

表3 材齢91日の実験結果

配合	電気抵抗率 (Ω・m)	自然電位 (mV)			ターフェル勾配 (V)		交換電流密度(A/m²)	
		アノード	カソード	自然電位差	アノード	カソード	アノード	カソード
OPC	29.12	-485	-308	177	0.47	0.24	5.24.E-03	1.00.E-03
GGBS45	76.74	-669	-502	167	0.57	0.35	6.23.E-03	4.52.E-03

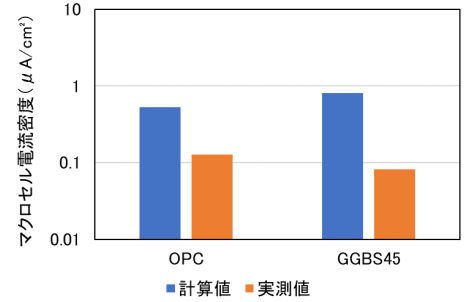


図3 マクロセル電流密度の計算値と実測値

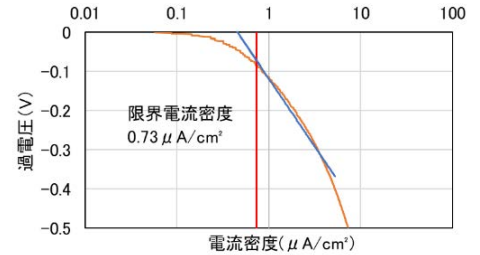


図4 限界電流密度の設定

3. マクロセル腐食解析モデルの概要

本研究では、有限要素法を用いたマクロセル腐食解析モデルを対象として、初期値・境界条件を変化させ実現現象を説明可能なモデルを構築することを目的として検討を行った。FEM 解析は COMSOL Multiphysics ver.5.3a を用いて、図2に示すように供試体の対称性を考慮して2次元の1/2モデルを対象とした。ラプラス方程式を支配方程式とし、ターフェル式を電極反応の境界条件として設定した。電極反応における反応速度は電流で表すことができ、これは電極電位に依存する。また、初期値として分割鉄筋(上・下)の自然電位、コンクリートの電気抵抗率(セル定数補正值)を一様と仮定して、その逆数から電気伝導率を算定した。以上の条件のもと、アノード・カソード間を流れる定常電流場におけるマクロセル電流密度を計算した。また、カソード反応における限界電流を仮定することで酸素拡散律速を表現するモデル化を行った。

4. 結果及び考察

各供試体において材齢91日に測定された実験結果を表3に示す。これらの電気化学的計測結果を入力パラメータとしてFEM解析により得られたマクロセル電流密度を図3に示す。なお、実験結果は、材齢88～91日までの平均値を示している。図より、いずれの供試体においても計算値は実測値より大きいことがわかる。特に、GGBS45の解析結果はOPCよりも高い値を示しており、マクロセル電流密度の実測値と整合しておらず、過大評価していることがわかる。この結果よりGGBS45の腐食抑制効果を説明する要因として、カソード分極試験により算出された酸素透過量(OPC: 4.5×10^{-11} (mol/cm²/sec), GGBS45: 1.8×10^{-11} (mol/cm²/sec))がGGBS45の方が小さい点に着目し、カソード電極反応の境界条件として限界電流を導入し、酸素拡散律速により腐食抑制効果を表現することとした。図4に限界電流密度を設定したカソード反応の境界条件を示す。限界電流を境界条件に設定した解析結果では、マクロセル電流密度は0.51A/cm²まで低減し、実測値で得られた腐食抑制効果を説明する要因になると考えられる。以上から、酸素透過量の小さいGGBS45に生じたマクロセル腐食では、酸素拡散律速によるカソード支配になっていることが示唆される。

5. まとめ

本研究では、コンクリート中铁筋のマクロセル腐食解析モデルについて、限界電流をカソード反応の境界条件に導入し、酸素拡散律速による腐食抑制効果を説明可能な解析モデルを構築した。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費(19H02216)の助成を受けたものである。

参考文献

1) 宮里：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・論理的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.547-552，2001