

## 銅スラグ微粉末を混入したコンクリートの防錆性の評価に関する研究

愛媛大学 賛助会員 柴田章弘

愛媛大学 正会員 氏家 勲 正会員 河合慶有

## 1. はじめに

現代社会において、資源を有効活用し持続可能な社会を形成する必要がある。建設産業では、これまでに産業廃棄物をコンクリートに用い、循環型社会の形成に大きな役割を担ってきた。銅精錬の副産物である銅スラグもその一つである。銅スラグは国内で約 300 万トンも生産されている。また、生産された銅スラグの約 7 割が輸出に依存しているのが現状である<sup>1)</sup>。よって、国内の天然資源の温存、海外輸送による温室効果ガス排出量の観点からも国内の推奨が望まれる。また、既往の研究において、銅スラグ細骨材を微粉末化することで、銅スラグの短所を改善し、銅スラグのコンクリートへの使用用途拡大を考え、銅スラグ微粉末を混和したコンクリートの機能性の評価に関する基礎的研究がなされた<sup>2)</sup>。しかし、既往の研究において、鉄筋腐食抵抗性の評価に関して、短期間での計測のため腐食性状に差異はみられなかった。よって本研究では、計測期間延長による電気化学的計測の継続、さらに供試体解体による鉄筋腐食性状を確認し、銅スラグ微粉末を混和したコンクリートの防錆性の評価に関する研究を行った。

## 2. 実験概要

## 2. 1 使用材料および供試体概要

供試体寸法は、断面 100×200 mm、高さ 150 mm とし、埋設した鉄筋には長さ 100 mm の丸鋼 φ22 を使用した。図 1 に示すように上下に分割した鉄筋を型枠底面からかぶりを 20 mm 確保して埋設した。鉄筋には節断面を垂直方向に二等分し、幅 2 mm を確保した鉄筋間をエポキシ樹脂により接着した分割鉄筋を用いた。本研究で検討した条件を図 1 示す。コンクリートは打設 3 日後脱型・材齢 28 日まで水中養生を行った。養生終了後に、かぶりを確保した面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆した。なお、コンクリートの配合を表 1 に示す。

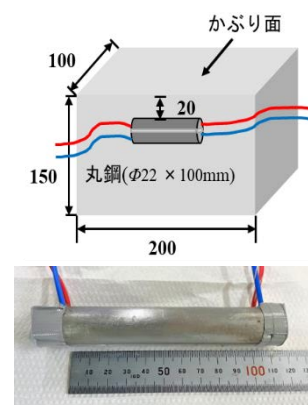


図 1 供試体概要

## 2. 2 塩害促進試験

塩害促進試験は、20°Cの実験室において塩水(濃度 10%)を用いて乾燥期間 4 日と湿潤期間 3 日の 1 週間を 1 サイクルとして行った。自然電位、分極抵抗、カソード分極曲線の測定は各サイクルの湿潤期間が終了した直後に行った。また、マクロセル電流密度は無抵抗電流計を用いて測定した。また、カソード分極試験の結果に基づいて酸素透過量を測定した。

## 2. 3 供試体解体及び測定方法

材齢 483 日経過後に乾式コンクリートカッターを用いて各供試体を切断し、埋設した鉄筋を取り出した。供試体解体後、鉄筋を目視による腐食状況の確認及びソルメイト試験による塩化物イオン含有量の測定を行った。また、腐食発生限界の判定基準として、土木学会「2007 年制定コンクリート標準示方書(維持管理編)」より塩化物イオン含有量を算出した。

表 1 配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )												
			水	セメント	銅スラグ微粉末			細骨材		粗骨材		塩	混和剤		
			W	C	4000	6000	8000	S1	S2	G1	G2	NaCl	AE減水剤	AE剤	
OPC	55	49	165	300	—	—	—	895	—	468	468	2.47	2.40	0.60	
CUS45				300	—	—	—	492	542	468	468		3.00	—	
銅スラグ微粉末				4000 40%	180	120	—	—	900	—	471		471	2.70	0.36
				6000 40%	180	—	120	—	900	—	471		471	2.70	0.36
				8000 40%	180	—	—	120	900	—	471		471	2.70	0.36

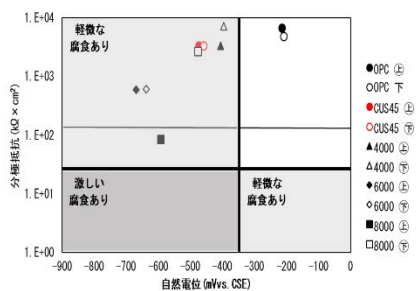


図2 自然電位及び分極抵抗の測定結果

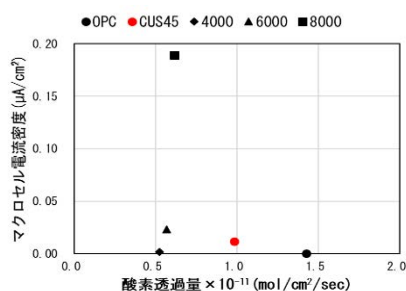


図3 マクロセル電流密度と酸素透過量

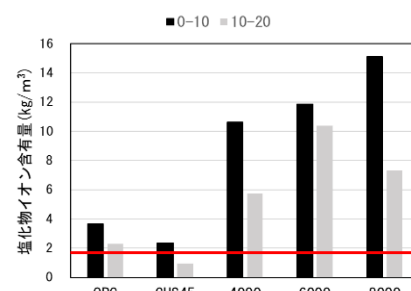


図9 塩化物イオン含有量の測定結果



図4 OPC(鉄筋上部)



図5 CUS45(鉄筋上部)



図6 4000(鉄筋上部)



図7 6000(鉄筋上部)



図8 8000(鉄筋上部)

### 3. 実験結果及び考察

自然電位及び分極抵抗の測定結果を組み合わせると腐食判定基準を図2に示す。自然電位と分極抵抗を組み合わせることにより、分極抵抗における腐食の判定精度の向上が期待できると考えられている<sup>3)</sup>。OPCを除くすべての供試体の鉄筋上部及び鉄筋下部において、軽微な腐食域に位置している。また、8000供試体において、鉄筋上下間で大きな自然電位差が認められる。次に図3にマクロセル電流密度と酸素透過量の関係について、図4～図8に供試体解体後の鉄筋表面の腐食状況を示す。8000供試体を除くすべての供試体で、マクロセル腐食発生のしきい値である $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を下回っており、マクロセル腐食は発生していないと考えられる。また、図4、図5より鉄筋上部に供試体作成時に鉄筋を固定するために用いたタコ糸に沿って、一部腐食生成物が確認されたが、鉄筋下部では確認されなかった。図6～図8より、銅スラグ微粉末を混和した供試体では鉄筋上部に腐食生成物が確認され、特に6000、及び8000供試体については鉄筋上部に著しい腐食生成物が確認された。また、8000供試体では、マクロセル電流密度の値が $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を上回っており、マクロセル腐食の発生が確認された。また、鉄筋上部がアノード部、鉄筋下部がカソード部となっており、電気化学的計測結果と、実際の鉄筋腐食状況は対応していた。次に、図9に塩化物イオン含有量の測定結果を示す。銅スラグ微粉末を混和した供試体では、腐食発生限界含有量を大幅に上回っており、鉄筋近傍への塩化物イオンの侵入が確認された。しかし、CUS45供試体では、腐食発生限界含有量を下回っており、今後、鉄筋腐食を遅らせることが示唆される。銅スラグ微粉末を混和したコンクリートは、OPC及びCUS45に比べ、鉄筋の腐食発生傾向が確認された。これは、本実験では銅スラグ微粉末をセメントに置換したため、セメント量の減少に伴い、コンクリートの緻密性の低下が要因ではないかと考える。

#### 参考文献

- 1) 浅見誠：銅スラグの現状と今後の課題，日本材料学会，Vol.65,No.11,pp.761-766,Nov.2016
- 2) 砂本璃久：銅スラグ微粉末を用いたコンクリートの防錆性・抗菌性に関する基礎的研究，愛媛大学学士論文，2021年1月
- 3) 岡崎慎一郎，加藤絵万，川端雄一郎，岩波光保：埋設型センサによる栈橋上部工RC部材の鉄筋腐食モニタリングに関する研究，独立行政法人 港湾空研技術研究所