

## 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中鉄筋のアノード分極特性

鹿児島大学大学院 学生会員 ○矢野 智大  
 鹿児島大学学術研究院 正会員 審良 善和, 山口 明伸, 小池 賢太郎

## 1. はじめに

塩害は、RC 構造物の耐久性を著しく低下させる要因の一つであり、その対策として遮塩性に優れた高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが広く利用されている。しかし、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの腐食特性に関する文献は少ないのが現状である。そこで、本研究では、普通ポルトランドセメントおよび、それに高炉スラグ微粉末を 25、50、70%の割合で置換したモルタル供試体を作製し、コンクリート中における鉄筋表面の環境を操作することが可能な腐食試験装置を用いてコンクリート中鉄筋のアノード分極特性の把握を行った。

## 2. 腐食試験装置による鋼材表面環境の操作手法

真空グローブボックスを用いてボックス内の環境を任意に操作することで、コンクリート中鉄筋表面の腐食環境を調整できる写真1に示す装置（以下、腐食試験装置）を用いた。本検討では、アノード分極挙動を測定することを目的に、以下の操作を行った。まず、分極曲線は鋼材全表面積での反応の平均的な値を測定するため、空隙や湿度等の影響を受ける。そこで、真空飽和处理によって鋼材表面を飽水状態にすることとした。方法は、真空度 150Pa 以下で3時間維持した後に、真空下で蒸留水を注水した。注水後、引き続き真空度 150Pa 以下で1時間維持させた。その後、酸素を除去する目的で窒素ガスをボックス内に注入し常圧に戻した。なお、この方法は、不動態皮膜等の鋼材表面の状態を変化させることのないように、それぞれの作業について時間設定したものである。

## 3. 実験概要

## 3.1 供試体の概要

実験に用いたモルタルの配合を表1、供試体概要図を図1に示す。供試体には、セメントに普通ポルトランドセメント、混和材に高炉スラグ微粉末を使用したモルタルを用いた。また、モルタル中の  $Cl^-$  がコンクリート換算で 0、1、2、4、6、8、10kg/m<sup>3</sup> となるように練混ぜ時に外割で NaCl を添加した。高炉スラグ微粉末の置換率は、高炉セメント A 種、B 種、C 種相当として、25% (BA)、50% (BB)、70% (BC) とした。また、比較用として、普通ポルトランドセメントのみの混和材の置換率 0% (OPC) も作製した。供試体内部には、供試体側面のかぶりが 18.5mm となるように、断面中央に  $\phi 13 \times 100$ mm の黒皮を除去したみがき丸鋼を埋設した。なお、鉄筋の検討範囲が供試体高さ方向中央部の 50mm とするために、両端部をエポキシ樹脂で被覆した。打設後 28 日間の封緘養生を行った後、鉄筋にリード線を接続し供試体の両端面をエポキシ樹脂で被覆した。

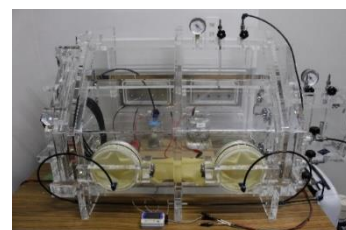


写真1 腐食試験装置

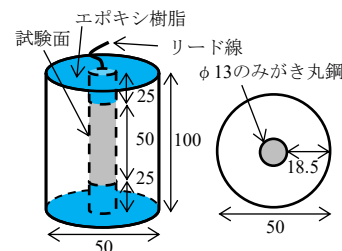


図1 供試体概要図

## 3.2 アノード分極試験の概要

2. によって鉄筋表面の酸素濃度を低下させた供試体を用いてアノード分極試験を実施した。測定方法は、電位制御として、自然電位から 500mV 程度貴側に分極させた。掃引速度は 20mV/min である。

## 4. 結果および考察

図2に OPC, BA, BB, BC の腐食試験環境下における  $Cl^-$  濃度が異なる各供試体のアノード分極曲線

表1 モルタルの配合

供試体名称	セメント 種類：C	混和材：A		W/B (%)	S/B	単位量			
		種類	置換率 (%)			W	C	A	S
OPC	OPC	高炉スラグ 微粉末	0	50	2.2	297	595	-	1305
BA			25			294	440	147	1310
BB			50			292	292	292	1305
BC			70			292	175	408	1301

キーワード 塩害, 鋼材腐食, 高炉スラグ微粉末, アノード分極曲線, 不動態皮膜, 孔食電位

連絡先 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1丁目21-24 TEL 099-285-8480

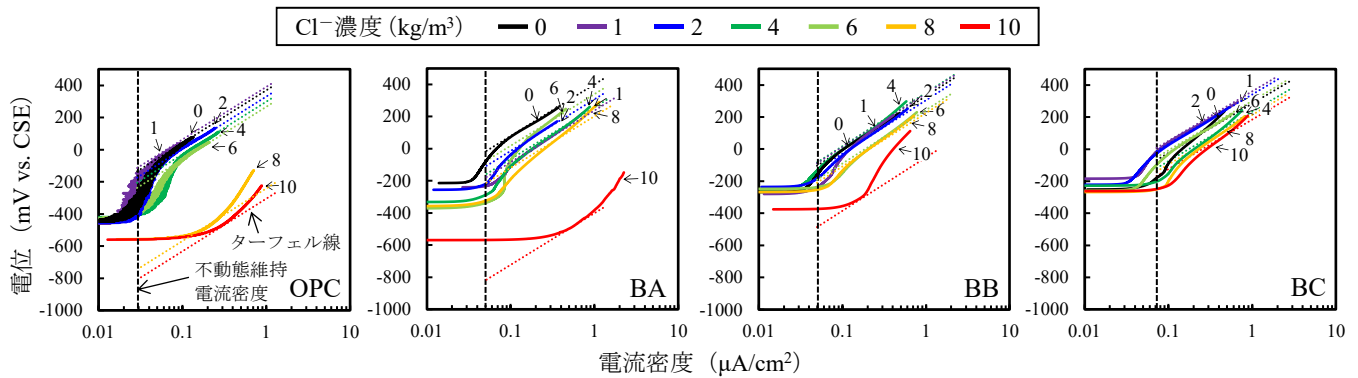
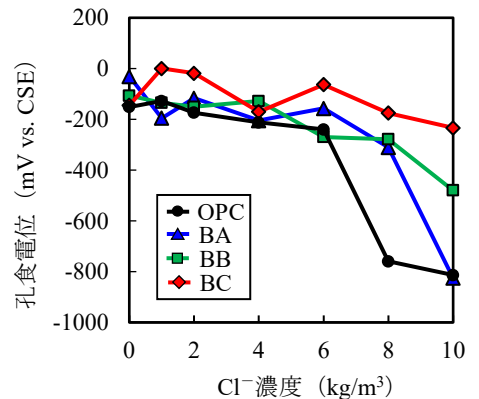


図2 アノード分極曲線

の結果について示す。いずれの材料も、アノード分極曲線は  $\text{Cl}^-$  濃度が増加するにつれて、電流密度が大きい方へとシフトする傾向が確認できた。OPC の  $\text{Cl}^-$  濃度 8, 10 $\text{kg/m}^3$  および BA, BB の  $\text{Cl}^-$  濃度 10 $\text{kg/m}^3$  を除いて、電位の貴な位置に分極曲線が位置し、不動態皮膜が存在していることが予想される。ここで、材料の違いについてみると、高炉スラグ微粉末の置換率増加に伴い分極曲線は電位の貴な位置にあり、BC では  $\text{Cl}^-$  濃度 10 $\text{kg/m}^3$  においても不動態皮膜が完全に破壊していない状態にあると予想される。材料によって挙動は異なるが  $\text{Cl}^-$  濃度が増加することで不動態皮膜が不安定な状態へ変化または不動態皮膜に欠陥が生じ、不動態維持電流密度が大きい方へ移行する傾向が確認できる。次に、不動態維持電流より貴側での変化点から線形部分が確認され、また、同程度の勾配を示していることから、ターフェル領域であると考えられる。一方で、OPC の  $\text{Cl}^-$  濃度 8, 10 $\text{kg/m}^3$  および BA, BB の  $\text{Cl}^-$  濃度 10 $\text{kg/m}^3$  については、不動態維持電流密度は確認できず、分極曲線は弧を描いた。これらの分極曲線に対して、ターフェル勾配は一定であると仮定し、分極曲線との接線から求めたターフェル線と  $\text{Cl}^-$  濃度が 0 $\text{kg/m}^3$  における不動態維持電流密度との交点から孔食電位を求めた。図3に各材料の  $\text{Cl}^-$  濃度と孔食電位の関係を示す。なお、孔食電位とは、不動態皮膜が破壊し、鉄の溶解が始まる電位である。孔食電位は、 $\text{Cl}^-$  濃度の増加に伴い卑化する傾向が認められ、特に OPC の  $\text{Cl}^-$  濃度が 6~8 $\text{kg/m}^3$ 、BA の  $\text{Cl}^-$  濃度が 8~10 $\text{kg/m}^3$  においては、その傾向が顕著であった。この範囲で不安定な不動態皮膜が限界に達し、完全に不動態皮膜が破壊したと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するに伴い、 $\text{Cl}^-$  濃度が 6 $\text{kg/m}^3$  以上の範囲において、孔食電位の卑化が緩やかになる傾向が確認された。このことは、高炉スラグ微粉末を混和することで、鉄の酸化反応に対する抵抗性が高くなることを意味する。これは、潜在水硬性によりコンクリートが緻密な構造となることで、鉄筋表面が緻密となり鉄の溶解の障壁となったためと予想される。なお、鉄筋の腐食速度は今回検討したアノード反応と酸素の還元によるカソード反応との酸化還元反応であり、設置される環境のカソード反応を定量化することで、腐食速度を算出することができると考えられる。

図3  $\text{Cl}^-$  濃度と孔食電位の関係

## 5. まとめ

コンクリート中鉄筋表面を任意の環境に操作することができる腐食試験装置を用いて、普通ポルトランドセメント (OPC) および、これに高炉スラグ微粉末を置換したセメント (BA, BB, BC 相当) を用いたモルタル中鉄筋のアノード分極特性について評価した。その結果、高炉スラグ微粉末の置換率を増加させるほど、腐食に対する抵抗性が高くなり、BC では、 $\text{Cl}^-$  濃度 10 $\text{kg/m}^3$  においても不動態皮膜が完全に破壊することはないと考えられる。

**謝辞：**本論文は、科研費基盤研究 (C) 18K04307 「塩害を受けるコンクリート中鉄筋の腐食に関する電気化学的特性の定量的把握」で得られた成果の一部である。

**参考文献：**1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：委員会報告書、電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会、2018.9