

京都大学大学院 学生員○中村士郎 正員 小林孝一

正員 服部篤史 フェロー 宮川豊章

1. 目的

コンクリート構造物の耐久性を検討する上で、鉄筋の腐食メカニズムを明らかにすることはきわめて重要である。近年研究が盛んに行われている高強度、高流動コンクリートなどには、セメント置換材料として高炉スラグ微粉末（以下スラグ）を用いることも多いが、スラグが鉄筋腐食に与える影響については不明な点も多い。特に、鉄筋腐食の非破壊探査に良く用いられている自然電位などの鉄筋の電気化学的測定については、スラグの使用によって普通コンクリートに比べて自然電位などが見掛け上腐食傾向を示す可能性もあり、詳しく検討する必要がある。本研究では、スラグを用いたコンクリート中の鉄筋の電気化学的測定を行い、塩害や中性化が作用したコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 配合 本研究で用いた基本配合を表1に示す。スラグの使用量や置換率が鉄筋腐食に与える影響について検討するために、水結合材比（W/B）を55、70%とし、スラグの置換率を0、60%とした。また、コンクリート中の塩化物イオン（Cl⁻）量が鉄筋腐食に与える影響について検討するために、表1の基本配合に対してCl⁻=0、1.3、3.0、

W/B (%)	s/a (%)	スラグ 置換率(%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	Sg	S	G
55	49	0	185	336	0	889	957
		60		134	202	882	950
70		0		264	0	917	988
		60		106	158	912	982

5.0kg/m³となるようにNaClを混入した。さらに、中性化が鉄筋腐食に与える影響について検討するために一部の供試体では中性化促進を行った。スラグは比表面積4000cm²/g程度のものを用いた。

2.2 供試体 供試体は10×10×40cmの角柱供試体で、D10の鉄筋2本をかぶり2cmで配置し、測定用にコードを接続した。NaClを混入する場合には塩水による練り混ぜを行った。ただし同量の細骨材を差し引いた。

2.3 養生、暴露方法 供試体は材令1日で脱型を行い、材令14日まで湿布養生、その後材令28日まで気中で乾燥させ、材令28日以降は実験室内で1日1回散水し、乾湿繰返し環境として鉄筋の腐食を促進させた。中性化促進を行う供試体は、材令28日まで他の供試体と同様の養生を行い、材令28日から温度20±2℃、相対湿度60±5%、炭酸ガス濃度5±0.2%の促進槽で45～90日間の中性化促進を行った後、乾湿繰返し環境に暴露した。

2.4 測定方法 材令2日から約2週間間隔で、照合電極に飽和塩化銀電極を用いて鉄筋の自然電位、分極抵抗を測定した。分極抵抗の測定は矩形波電流法（電流10～100μA、周波数800Hz、0.1Hzの矩形波重畳パルス）によって行い、分極抵抗の逆数が鉄筋の腐食速度と比例関係にあると考えられることから、分極抵抗の測定値R_pと鉄筋の表面積Aより腐食速度指標1/(R_p×A)を算出し、鉄筋の腐食速度に関して検討を行った。また、材令270日程度ですべての供試体の鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率、腐食減量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 スラグ置換率やCl⁻量が鉄筋腐食に与える影響 材令270日における、W/B=55%、スラグ置換率を0、60%とした場合のCl⁻量と自然電位、腐食速度指標の関係を図1、2に示す。コンクリート中にCl⁻を含まない場合には、スラグ置換率に関わらず自然電位は貴な値となり、非腐食領域に分類される。本実験では、Cl⁻を含まないスラグコンクリート中の鉄筋の自然電位などが見掛け上腐食傾向を示すような現象は認められなかった。また、コンクリート中に

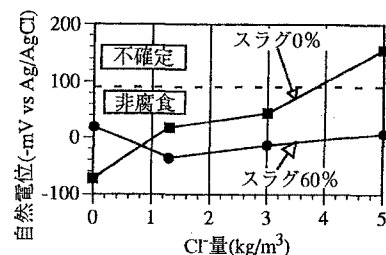


図1 Cl⁻量と自然電位の関係（材令270日）

Shiro NAKAMURA, Koichi KOBAYASHI, Atsushi HATTORI, Toyoaki MIYAGAWA

Cl⁻を含む場合には、スラグを用いない普通コンクリートでは、Cl⁻量の増加に伴い自然電位は卑変し、腐食速度指標は増加するのに対し、スラグ置換率を60%とした場合には、自然電位、腐食速度指標ともにCl⁻量の影響は小さく、Cl⁻を5kg/m³程度まで含んでも自然電位は非腐食領域に分類され、腐食速度指標も普通コンクリートに比べ小さい。したがって、本実験の範囲では、スラグコンクリートの方が普通コンクリートに比べて塩害に対する鉄筋の防食効果が高いと考えられる。

3.2 塩害と中性化の複合作用が鉄筋腐食に与える影響 W/B=70%、スラグ置換率が0、60%で45~90日間の中性化促進を行った場合の中性化深さを表

2に示す。W/Bが70%と大きい場合にはスラグコンクリートの中性化速度は大きい。これは、スラグの反応にCa(OH)₂が消費されるためだと考えられる。スラグ置換率0%の場合には中性化促進期間90日で中性化はほぼ鉄筋位置まで達しており、スラグ置換率60%の場合には促進

期間45日以前に中性化が鉄筋位置まで達していた。このような中性化促進を行った供試体中の鉄筋の自然電位、腐食速度指標を図3、4に示す。コンクリート中にCl⁻を3kg/m³含む場合には、自然電位はスラグ置換率に関わらず中性化の作用により大きく卑変し、中性化深さが20mm以下で中性化が鉄筋位置まで達していない場合もASTMの判定基準では腐食領域に分類される。また、腐食速度指標は、スラグ置換率に関わらず中性化深さの増加とともに大きくなっている。一方、塩分を含まない場合、中性化が鉄筋位置まで達した供試体では自然電位が卑変するものの、その腐食速度指標は塩分を含む場合に比べるとかなり小さい。したがって、中性化の生じたコンクリートでの鉄筋腐食は塩分量の影響を大きくうけ、中性化と塩害が複合的に作用するような場合には、非常に激しい腐食を生じる可能性があると考えられる。

3.3 腐食推定量と実際の腐食量の関係 分極抵抗の測定値から算出した腐食速度指標を時間積分した腐食量指標は、実際に測定を行った鉄筋の腐食減量に対応すると考えられる。材令270日ではつり出した鉄筋の腐食減量と腐食量指標の関係を図5に示す。両者の間には相関があり、塩分量や中性化深さが鉄筋の腐食減量に与える影響についても3.1、3.2節で述べた推定結果とほぼ一致していた。また、鉄筋の腐食減量と腐食量指標の間の比例定数K値は14mVであった。スラグの使用がK値に与える影響はほとんど見られず、本実験の範囲では腐食モニタリングの結果から鉄筋の腐食量を推定する上でスラグの有無を特に考慮する必要はないと考えられる。

4. 結論 本研究の範囲では、スラグの使用によって塩害による鉄筋腐食に対する耐久性は向上するが、中性化速度が大きくなることから塩害との複合的な作用によって激しい腐食が生じる危険性もあるという推定結果となり、実際にはつりだした鉄筋の腐食状況も同様の傾向を示した。しかし、環境条件が違う場合などに、スラグが鉄筋腐食や鉄筋の電気化学的特性に影響を与える可能性もあり、今後検討する必要がある。

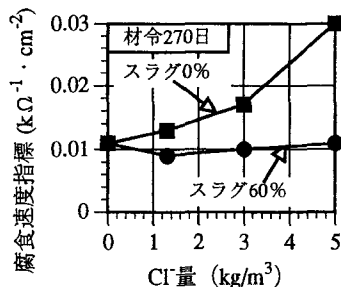


図2 Cl⁻量と腐食速度指標の関係

表2 中性化深さ

W/B (%)	スラグ置換率 (%)	中性化深さ (mm)		中性化速度係数 (mm/√day)
		促進45日	90日	
70	0	12.9	18.9	1.94
	60	21.6	34.0	3.43

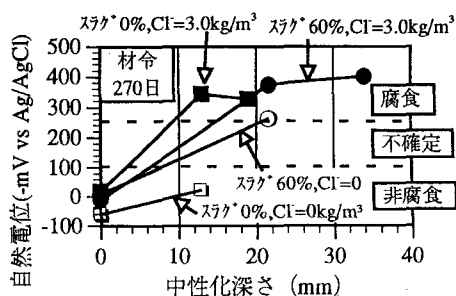


図3 中性化深さと自然電位の関係

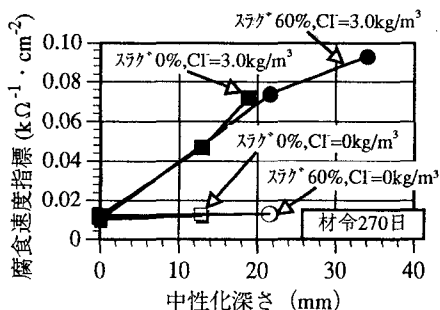


図4 中性化深さと腐食速度指標の関係

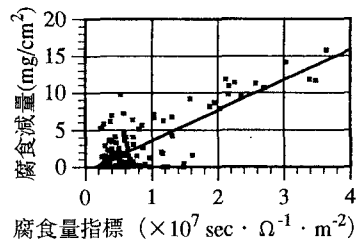


図5 推定腐食量と腐食減量の関係