

高炉スラグ微粉末を用いたモルタル部材の酸性雨と中性化の複合劣化に関する基礎的研究

鹿児島大学 学生会員 ○松元 淳一 鹿児島大学 正会員 武若 耕司
 鹿児島大学 正会員 山口 明伸 鹿児島大学 学生会員 樋原 弘貴

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物において複合劣化が大きな問題となっている。酸性雨によるコンクリート構造物の劣化も、実質的には、大気中の二酸化炭素による中性化と酸性雨による化学的侵食の複合劣化と考えられる。特に、塩害や ASR 対策として多く用いられている高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについては、酸性雨環境での影響について不明な点が多い。そこで、本研究においては、高炉スラグ微粉末の置換率および初期水中養生期間を変化させたモルタル供試体を用いて、酸性雨と中性化の複合劣化についての実験的検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いたモルタル供試体の配合を表-1 に示す。配合決定に際しては、ペースト容積比を一定にし、目標フローを 200mm として配合を定めた。使用材料を表-2 に示す。高炉スラグ微粉末は密度 2.90g/cm^3 で比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のものを使用し、高炉スラグ微粉末置換率（以下、スラグ置換率と称す。）は 0, 50, 70% の 3 種類とした。実験供試体の形状を図-1 に、供試体の要因と水準を表-3 に示す。供試体はかぶり 3cm として鉄筋を埋設し、試験面のみの検討を行うために側面および底面はエポキシ樹脂にて被覆を行った。なお、初期水中養生期間（以下、初期養生期間と称す。）の違いによる検討も行うため、初期養生期間を 7 日、28 日および 91 日の 3 種類とした。また、劣化促進試験方法については、本研究室で開発した酸性雨劣化促進試験装置を CO_2 濃度 5% の室内に設置することで実施し、酸性雨散布と中性化促進を併せた複合劣化促進試験とし、その試験条件は、既往の研究¹⁾ より 1 サイクルが 1 年に相当する中性化が進行するように設定した。実施した促進試験条件を表-4 に示す。

3. 試験結果および考察

ここでは一例として、図-2 に、初期養生期間 28 日供試体における酸性雨散布および比較のため実施した蒸留水散布それぞれについて、30 サイクル（想定 30 年）終了時までのモルタルの中性化深さの経時変化を示す。いずれの散布溶液を用いた場合でも、スラグ置換率が大きくなるにつれ、中性化深さも大きくなり、また、酸性雨散布の方が蒸留水散布に比べ中性化深さが幾分大きくなった。これは、酸性雨による中性化促進作用²⁾ が高炉スラグ微粉末を用いた場合にも明らかに生じることを示している。また、図-3 には、同じく初期養生期間

表-1 供試体配合

W/B (%)	ペースト容積比	呼称	スラグ置換率 (%)	単位量 (kg/m^3)			
				W	C	BFS	S
70	0.42	OPC70	0	289	413	0	1525
		BB70	50	285	204	204	1525
		BC70	70	284	122	284	1525

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm^3)
混和材	高炉スラグ微粉末 (密度 2.90g/cm^3 , ブレーン値 $4000\text{cm}^2/\text{g}$)
細骨材	富士川産川砂 (密度 2.65g/cm^3 , 吸水率 1.93%)

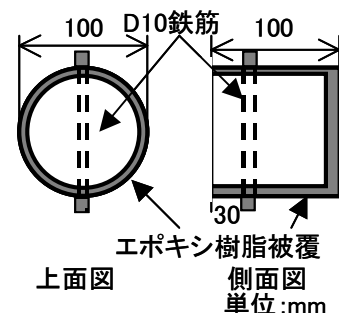


図-1 実験供試体概要図

表-3 供試体の要因と水準

W/B (%)	70
初期養生期間 (日)	7, 28, 91
スラグ置換率 (%)	0, 50, 70
鉄筋かぶり (cm)	3
ひび割れ幅 (mm)	0

表-4 促進試験の条件

1サイクル設定年数		1年
1サイクル	散布時間	22時間
	乾燥時間	74時間
散布溶液		・酸性溶液 (pH3.0) ・蒸留水 (pH5.6)
散布量		2250L/㎡
CO ₂ 濃度		5%

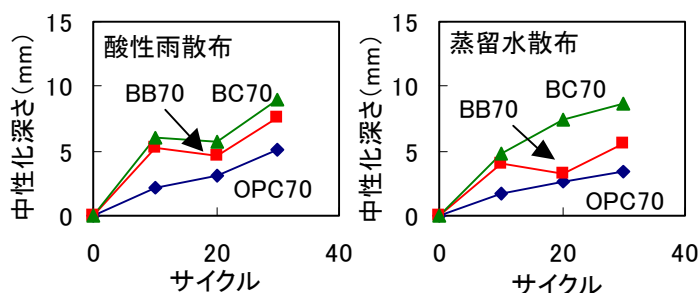


図-2 初期養生期間 28 日供試体の酸性雨および蒸留水散布の中性化深さの経時変化

28 日供試体試験期間 30 サイクルまでの鉄筋腐食面積率の経時変化を示した。この結果、スラグ置換率が大きくなるに従って鉄筋腐食面積も大きくなることが確認された。ただし、図-4 に BC70 供試体において初期養生期間が異なる場合の鉄筋腐食面積率の経時変化の違いを示しているが、初期養生期間が 91 日と長期になると鉄筋腐食面積率は低下する傾向を示したことから、初期養生を十分に行うことで鉄筋腐食はある程度は抑制されるようであった。また、図-3 から、酸性雨散布の方が蒸留水散布に比べ、鉄筋腐食面積率が大きくなる傾向も明確に示されている。

そこで、鉄筋の腐食要因を確認するため、初期養生期間 28 日供試体に対して酸性雨散布を 30 サイクル行った後のモルタルについて、モルタル中の pH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CaCO_3 の深さ方向の分布ならびに、鉄筋近傍モルタルの細孔容積分布の測定を行った。まず、図-5 に、表面から深さ方向の pH 分布を示すが、高炉スラグ微粉末を置換した場合、普通 PC のみを使用した OPC70 供試体に比べ供試体内部の pH は低く、特に、BC70 供試体は鉄筋近傍で pH11.49 と低い値を示した。また、図-6 には、示差熱重量分析で得られた BC70 供試体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CaCO_3 の含有量分布を示す。この結果、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は中性化領域では存在しないものの、中性化遷移領域より若干増加する傾向を示したが、鉄筋近傍の未中性化領域においても、それほど多くは増加せず、初期の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有量自体が極めて少ないものと予想された。このため、これによる $[\text{OH}^-]$ の絶対量の低下が高炉スラグ微粉末使用のモルタル中の鉄筋腐食に影響を与えたものと考えられる。また、図-7 には、鉄筋近傍のモルタル中の細孔容積分布を示した。高炉スラグ微粉末を置換した場合、 10^2nm 以下のゲル空隙に細孔容積のピークがあり組織の緻密化が予想されるが、その一方で、 $10^2\sim 10^4\text{nm}$ の毛細管空隙では、OPC70 供試体より高炉スラグ微粉末を置換した方が細孔容積が大きくなる状況も認められることから、酸性雨中の SO_4^{2-} や Cl^- などが部分的に浸透しやすい状況となり、鉄筋腐食に関与した可能性もある。

4. まとめ

酸性雨と中性化が複合することで、高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置換した場合でも酸性雨による中性化、鉄筋腐食の促進作用が認められた。また、スラグ置換率が大きくなるに従って、中性化や鉄筋腐食が大きくなる傾向にあったが、一方、十分に初期養生期間を長くすることで、これらはある程度抑制できることも確認された。なお、高炉スラグ微粉末使用の場合、鉄筋の腐食が促進される原因の一つとしてモルタル内部の $[\text{OH}^-]$ がスラグの使用によって減少することも確認した。

謝辞：本研究は、平成 15 年度、鉄鋼スラグ協会研究奨励金により実施した研究の一部である。関係者各位に心より感謝する次第である。

参考文献：1) 審良ら：酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 23，No. 2，pp. 649，2001 2) コンクリート構造物の酸性雨劣化機構に関する研究，土木学会論文集，No. 774/V-65，pp. 73-82，2004

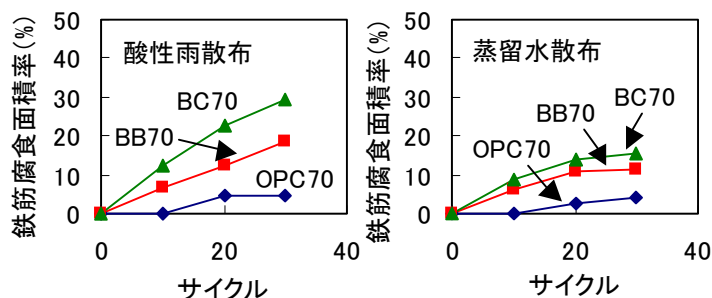


図-3 初期養生期間 28 日供試体の酸性雨および蒸留水散布の鉄筋腐食面積率の経時変化

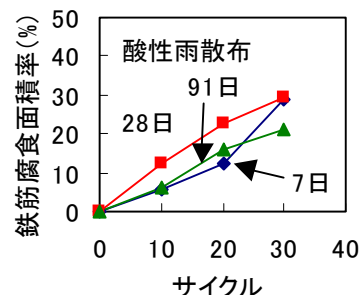


図-4 BC70 供試体の初期養生期間毎における酸性雨散布の鉄筋腐食面積率の経時変化

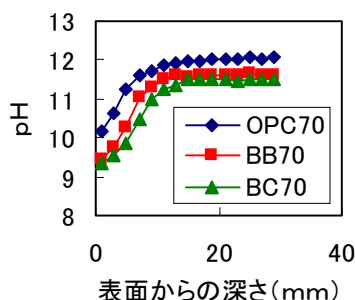


図-5 初期養生期間 28 日供試体の酸性雨散布の pH 分布

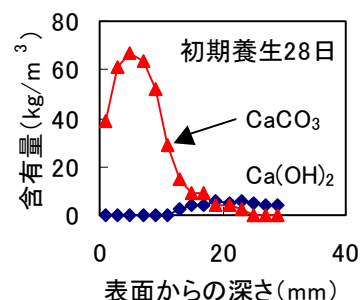


図-6 BC70 供試体の酸性雨散布の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および CaCO_3 の含有量分布

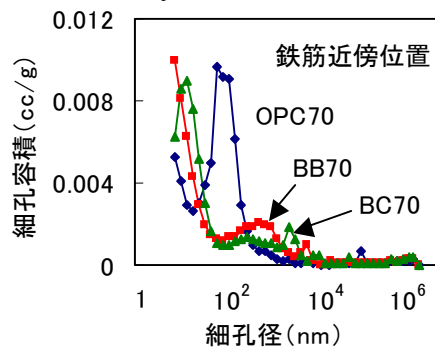


図-7 初期養生期間 28 日供試体の鉄筋近傍の細孔容積分布