

塩害 - 炭酸化複合劣化抑制のための高炉スラグ微粉末の最適使用量に関する実験的検討

鹿児島大学工学部 学生会員 梅木 真理 鹿児島大学工学部 正会員 武若 耕司
 鹿児島大学大学院 学生会員 松元 淳一 鹿児島大学工学部 正会員 山口 明伸

1. はじめに

これまでの検討により、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物が「塩害と炭酸化」の複合劣化の影響を受けた場合は、「塩害単独」の場合とは異なり、必ずしもスラグ置換率の増加が鉄筋防食効果にはつながらないことが確認されている¹⁾。一方、同じ高炉セメント B 種の高炉スラグ微粉末置換率(以下、スラグ置換率と称す)は 30% から 60% の範囲と規定されていることから、上記の様な複合劣化環境では、全ての高炉セメント B 種が、高い耐久性を確保しているとは限らない可能性がある。そこで本研究は、スラグ置換率を 30~60% に変化させたコンクリート供試体を用いて塩害と炭酸化の複合劣化について実験的検討を行い、複合劣化抑制のための最適な高炉スラグ微粉末の置換率を明確にすることを試みた。

2. 実験概要

実験に用いたコンクリート供試体の配合を表 - 1 に示す。なお、配合決定に際しては単位水量および細骨材率を一定とし、目標スランブを 10±2cm として定めた。使用材料を表 - 2 に示す。高炉スラグ微粉末は密度 2.90g/m³、目標ブレン値 4000cm²/g のものを使用し、スラグ置換率は 30, 35, 40, 45, 50, 55 および 60% の 7 種類とした。また、初期

表 - 1 供試体配合

W/B (%)	s/a (%)	スラグ置換率 (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)
			W	C	BFS	S	G	
70	49	30	195	195	84	898	928	8
		35		181	98	898	927	8.5
		40		167	111	897	927	9.5
		45		153	125	897	926	9.5
		50		139	139	896	926	10
		55		125	153	896	925	10
		60		111	167	895	925	10

水中養生期間はいずれも 28 日間とした。実験供試体の形状を図 - 1 に示す。供試体は 10×10×10cm の立方供試体にかぶり 3cm として鉄筋を 2 本埋設し、初期養生後 2 日間乾燥させた後、試験面のみを残して他の面をエポキシ樹脂で被覆をした。曝露方法としては、

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 ,ブレン値4000cm ² /g)
細骨材	富士川産川砂(密度2.64g/cm ³ ,吸水率1.76%)

塩水浸せきと炭酸化促進を複合させた促進試験(以下、「塩害 - 炭酸化試験」と称す)とし、塩水浸せき装置を高 CO₂ 濃度環境に設置することによって実施した。また、比較用に、浸せき溶液を蒸留水とし炭酸化のみの影響を検討する場合(以下、「炭酸化試験」と称す)と、炭酸化促進を行わず一般環境で塩水浸せきと乾燥を繰り返し行った場合(以下、「塩害試験」と称す)も同時に行った。ここで、促進試験

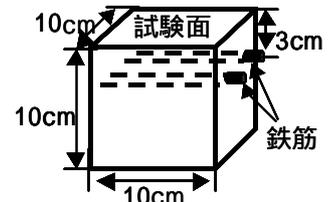


図 - 1 実験供試体形状

方法を表 - 3 に試験環境の条件を表 - 4 に示す。いずれの場合も浸せき 3.5 日と乾燥 3.5 日の繰り返しを 1 サイクルとし、40 サイクルまで行うことにした。なお、塩水浸せきに用いた溶液は NaCl 5% 水溶液とし、炭酸化促進については、1 サイク

表 - 3 各促進試験の方法

	浸せき環境	乾燥環境
塩害 炭酸化試験	NaCl 水溶液 5%	CO ₂ 濃度 5%
塩害試験	NaCl 水溶液 5%	気中乾燥
炭酸化試験	蒸留水	CO ₂ 濃度 5%

ルで 1 年に相当する中性化が進行するよう環境室内の CO₂ 濃度を 5% に設定して行った²⁾。ここでは 20 サイクル終了時の結果について報告する。

3. 結果および考察

「塩害 - 炭酸化試験」あるいは「炭酸化試験」をそれぞれ 20 サイクル行った後の中性化深さを図 - 2 に示す。いずれの試験においても既往の研究結果と同様に、高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるにつれ中性化深さは大きくなる傾向を示した¹⁾。しかしながら、スラグ置換率が 40% 以上になると、塩水が作用した場合の方が炭酸化単独に比べ中性化の進行は抑えられる傾向にあり、ある程度

表 - 4 促進試験の環境条件

1 サイクル	浸せき時間	3.5 日 / サイクル
	乾燥時間	3.5 日 / サイクル
CO ₂ 濃度		0, 5%
温度		30
湿度 (乾燥環境)		70 ~ 100%
浸せき溶液	NaCl 5% 溶液	
	蒸留水	

スラグを混入することで、コンクリート表層部で塩分とスラグにより細孔組織の形成に何らかの影響を与えている可能性があると予想される。

図-3に、一例として、スラグ置換率 30,50 および 60% 供試体の「塩害 - 炭酸化試験」および「塩害試験」における 20 サイクル終了時のコンクリート中の全塩化物イオン量分布をそれぞれ示す。なお、以前に著者らが行った「塩害 - 炭酸化試験」におけるスラグ無混入の結果についても併せて示した。これより、「塩害 - 炭酸化試験」供試体の方が「塩害試験」供試体よりも全塩化物イオン含有量が全体的に多く、炭酸化の影響から供試体表面よりわずかに内部で塩化物の濃縮が見られる結果となった。ただし、スラグ無混入の場合に比べ、塩化物イオンの浸透は抑えられており、スラグ置換率が 30% 程度と小さい場合でも塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は極めて高いものと考えられた。

図-4に「塩害試験」、「炭酸化試験」および「塩害 - 炭酸化試験」を 20 サイクルまで行った後の鉄筋腐食面積率をそれぞれ示した。高炉セメント B 種相当の高炉スラグ微粉末で置換していることから鉄筋腐食量は全体的に極めて少なく、「塩害試験」の結果ではいずれのスラグ置換率も鉄筋の腐食は殆ど発生しておらず、従来から言われているように、塩害単独の環境では高炉スラグ微粉末使用による鉄筋腐食抑制効果が高いと考えられる。これに対して、「炭酸化試験」ではスラグ置換率が 55% 以上になると腐食しやすい状況が認められた。一方、「塩害 - 炭酸化試験」の場合について見ると、多少ばらつきはあるが、スラグ置換率 35 ~ 55% の間では鉄筋腐食面積率が微少であったのに対し、スラグ置換率が 60% では

「炭酸化試験」同様に 1.5% 程度の腐食量が認められており、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が高くても鉄筋腐食抑制効果が高いとは言えない結果となった。

この結果をより詳細に検討するために水酸化カルシウム量の観点からの評価を試みた。図-5に示差熱重量分析で得られた「塩害 - 炭酸化試験」の各供試体中における鉄筋埋設位置での $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量を示す。この結果、スラグ置換率 60% 供試体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は明らかに少なく、 $[\text{OH}^-]$ の絶対量の低下が腐食に影響を与えたものと考えられる。

4. まとめ

複合劣化環境下で高炉セメント B 種に相当する高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋腐食は、スラグ置換率 35% ~ 55% では、殆ど腐食が認められなかったのに対し、スラグ置換率が 60% 程度では大きくなる傾向にあった。その原因の一つとして、スラグ混入量が増加するに従って、コンクリート内部の $[\text{OH}^-]$ が減少するためであると予想された。ただし、今回は 20 サイクルという初期段階の結果であり、長期耐久性に優れている高炉セメント B 種コンクリートの特性を考慮すれば長期に渡って試験を継続し、複合劣化環境下における最適な高炉スラグ微粉末置換率を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松元淳一ほか:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物の複合劣化に関する実験的検討,コンクリート工学年次論文集,vol.27,No1,pp.163-168,2005
- 2) 松元淳一ほか:塩害と炭酸化の複合劣化が高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物に与える影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文集,vol.7,pp.265-270,2007

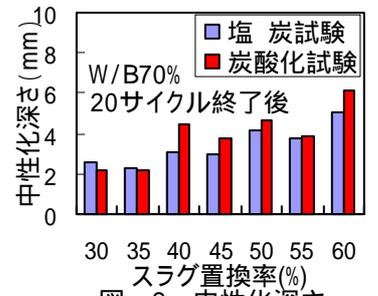


図-2 中性化深さ

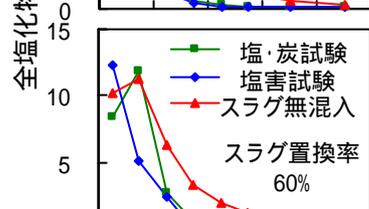
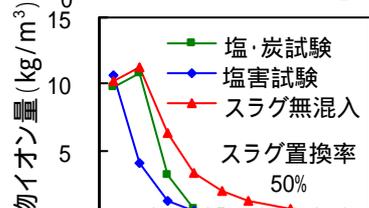
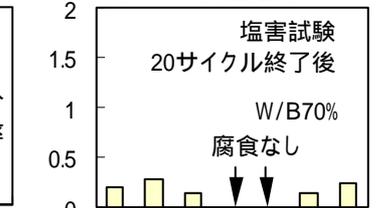


図-3 20 サイクル終了時の全塩化物イオン量分布 (W/B=70%)

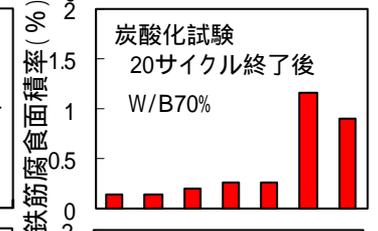


図-4 試験ごとの鉄筋腐食面積率

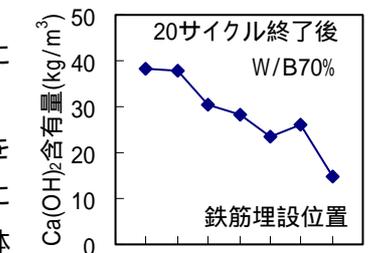


図-5 鉄筋埋設位置での $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量