

「塩害 - 炭酸化」の複合環境下に曝された  
低熱高炉セメントB種使用コンクリートの耐久性に関する実験的検討

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

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、「塩害単独」の場合とは異なり、鉄筋防食効果を有効に発揮するスラグ置換率が明確に存在し、その範囲が45% - 55%となることが明らかとなった<sup>1)</sup>。近年、耐久性向上を目的として高炉スラグ微粉末を使用した際、温度ひび割れが発生するという事例が多数報告され、この対策として低熱高炉セメントB種が開発されているが、このセメントを使用したコンクリートの耐久性までを考慮した性能評価については、未だ十分な検討がなされていないのが現状である。そこで本研究は、塩害と炭酸化の複合劣化が低熱高炉セメントB種使用コンクリート構造物に与える影響について実験的な検討を行った。

2.実験概要

実験には、W/C50%および70%のコンクリートを用いた。使用材料は、表-1に示すようにセメントは低熱高炉セメントB種(以下、LBB)を基本とし、比較用として、普通ポルトランドセメント(以下、OPC)および高炉セメントB種(以下、BB)を用いた場合についても検討を行った。コンクリートの配合は表-2に示すように、単位水量および細骨材率を

表-1 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 <sup>3</sup> )
	高炉セメントB種 (密度3.02g/cm <sup>3</sup> , プレーン値4000cm <sup>2</sup> /g)
	低熱高炉セメントB種 (密度2.98g/cm <sup>3</sup> , プレーン値3200cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	富士川産川砂(2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.76%)
粗骨材	始良産砕石(密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.61%)

表-2 供試体配合および圧縮強度

一定とし、目標スランブを8±2cmとして各W/Cごとに定めた。なお、これらのコンクリートの圧縮強度については、10×20cmの円柱供試体を用いて、所定の材齢で試験を行い、表-2に示すように、W/Cの如何に拘らず、初期水中養生28日および91日後の強度では、LBB供試体の方が

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
			W	C	S	G	28日	91日	182日
OPC	70	49	190	271	906	936	24.58	31.47	34.24
BB					910	940	25.79	32.77	38.19
LBB					904	934	21.39	29.11	35.23
OPC	50	45	190	380	795	965	43.54	50.68	58.00
BB					789	957	37.85	48.02	55.82
LBB					787	955	30.45	37.27	50.95

OPC供試体に比べ小さかったものの、182日養生後には、OPC供試体と同程度となっていた。

使用した供試体は、図-1に示すようにかぶり3cmとなるように鉄筋を配筋した円柱供試体である。その作製にあたっては、まず、10cm×20cmの型枠に鉄筋を配筋してコンクリートを打設し、初期水中養生後、中央で2つに切断して供試体とした。これは、切断面を試験面とすることで、打設方向の影響をなくするためである。その後、いずれの供試体も、試験面を除く側面および底面をエポキシ樹脂にて被覆した。なお、初期水中養生は水温20

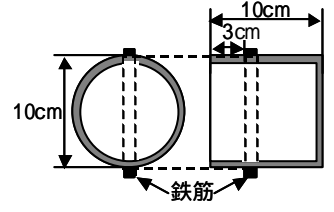


図-1 供試体形状

の恒温水槽で行い、初期養生期間の違いが耐久性に及ぼす影響も検討するため、初期養生期間が7日と28日の2種類の場合について検討を行った。

劣化試験は、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」とし、塩水浸せき装置を高CO<sub>2</sub>濃度環境に設置して浸せきと乾燥を繰り返すことで、この複合劣化状況を再現させた。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

表-3 促進試験環境条件

1サイクル	浸せき時間	3.5日
	乾燥時間	7.0日
CO <sub>2</sub> 濃度		0, 5%
温度		30
湿度		70 ~ 100%
浸せき溶液		・ NaCl5%水溶液 ・ 蒸留水

(以下、「炭酸化試験」)ならびに、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た場合(以下、「塩害試験」)についても同時に行った。表-3に試験環境

表-4 各試験の浸せき方法および乾燥方法

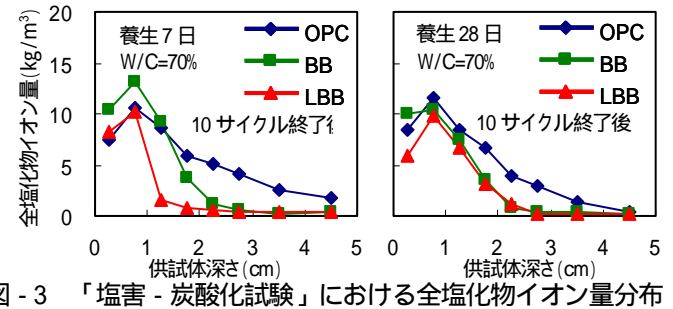
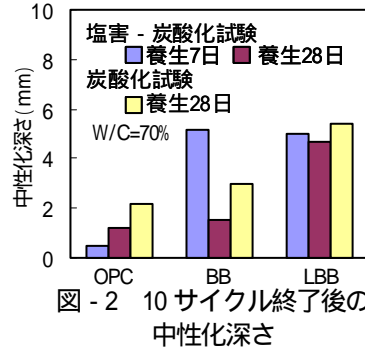
	塩害 - 炭酸化試験	炭酸化試験	塩害試験
浸せき方法	塩水(NaCl5%) 浸せき	蒸留水 浸せき	塩水(NaCl5%) 浸せき
乾燥方法	炭酸化促進	炭酸化促進	気中乾燥

の条件を、各試験の浸せき方法および乾燥方法を表-4に示す。いずれの場合も浸せき3.5日と乾燥7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NaCl5%水溶液とし、炭酸化促進については、環境

室内のCO<sub>2</sub>濃度を5%に設定した。ここでは、W/C70%供試体の10サイクル終了時の結果について報告する。

3. 試験結果および考察

初期養生7日および28日供試体に「塩害 - 炭酸化試験」を10サイクルまで行った



た場合の中性化深さを図-2に示す。なお、初期養生28日供試体においては「炭酸化試験」を10サイクルまで実施した結果についても併せて示した。初期養生期間や劣化環境条件の違いに拘らず、LBBを使用したコンクリートの方が、OPCあるいはBB使用の場合に比べ中性化深さが大きくなる傾向を示した。なお、「塩害 - 炭酸化試験」と「炭酸化試験」の結果を比較すると、いずれのセメントを使用した場合でも、塩害と炭酸化の複合劣化環境の方が炭酸化単独環境よりも中性化はかえって遅くなる傾向にあった。また、初期養生期間の相違が炭酸化の進行に及ぼす影響について見ると、BB使用の場合には28日程度の養生で炭酸化の進行をある程度抑制できるのに対し、LBB使用では、初期養生を28日まで延長しても炭酸化の進行を抑制できるまでに至らない。これは、強度発現性とも関連し、初期養生28日程度では、LBB使用コンクリートの内部組織は未だ十分に緻密化していないことに起因すると思われる。

図-3には初期養生期間7日および28日供試体における「塩害 - 炭酸化試験」10サイクル終了時のコンクリート内部の全塩化物イオン量分布をそれぞれ示す。この結果、初期養生期間やコンクリートの種類の違いによらず、コンクリート表層部深さ1cm程度の範囲における全塩化物イオン量は10kg/m<sup>3</sup>程度で、ほぼ同程度であったが、供試体内部の鉄筋位置(深さ3cm)についてみると、OPC供試体では既に腐食発生限界量(1.2kg/m<sup>3</sup>)の2倍程度であったのに対し、BBおよびLBB供試体では、全塩化物イオン量は0.25~0.65kg/m<sup>3</sup>と極めて少なく、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は顕著であった。

図-4には、初期養生28日供試体に「塩害 - 炭酸化試験」、「塩害試験」を10サイクルまで行った時点での各コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数の算定結果を示す。この結果からも、LBBを使用したコンクリートがBB使用の場合と同程度の塩化物イオン浸透抑制性能を有することを確認できる。なお、塩害と炭酸化複合劣化環境と塩害単独環境それぞれでのコンクリートの拡散係数の値を比較すると、いずれのセメントを使用した場合も複合劣化環境における拡散係数の方が大きくなる傾向にあったが、この傾向は過去の著者らの研究結果と一致するものであった<sup>2)</sup>。

図-5には、初期養生28日供試体において「塩害 - 炭酸化試験」、「塩害試験」および「炭酸化試験」を10サイクルまで行った後の鉄筋腐食面積率をそれぞれ示す。なお、「塩害 - 炭酸化試験」においては、初期養生7日供試体の結果も併せて示した。このうち、「塩害試験」では、10サイクルまでの間、セメント種類の如何に拘らず鉄筋腐食は認められなかった。「炭酸化試験」では、BBおよびLBB供試体において僅かではあるが腐食が確認され、これらのセメントを使用したコンクリートの炭酸化に対する抵抗性が幾分劣る結果となった。一方、「塩害 - 炭酸化試験」では、初期養生28日の場合、いずれのセメントを使用しても鉄筋腐食は認められなかったが、初期養生7日の場合についてみると、OPCおよびBB供試体では腐食発生が明確に認められたのに対し、LBB供試体においては全く腐食が確認されない結果となった。これについては、図-3において、初期養生7日のLBB供試体のコンクリート内部の塩化物イオン量が他のコンクリートに比べて著しく少なかったことに一因があると考えられるが、その理由については未だ不明であり、今後、さらに長期の試験を継続し、確認していく予定である。

いずれにしても、今回の結果から、少なくとも塩害と炭酸化が複合する環境においては、LBB使用コンクリートは、BB使用の場合と同程度もしくはそれ以上の長期耐久性を有していることが予想された。

謝辞：本研究は、平成20年度、セメント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) 梅木真理ほか: 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, 土木学会西部支部研究発表会, pp.801-802, 2008  
 2) 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, No.1, pp.163-168, 2005