

コンクリートの溶脱と塩害の複合劣化に関する研究

東洋大学 学生会員 ○嶺山修也 馬場海人 横川勇輝 正会員 横関康祐
鹿島建設(株) 正会員 取達剛 関健吾

1. 背景・目的

海に囲まれた日本では、これまでに数多くの海洋構造物が建設されてきた。海洋構造物は一般の構造物と比較して塩害が発生しやすい。一方、軟水がコンクリートと接するとコンクリート中の成分が溶け出す溶脱が発生することが分かっている。これら溶脱と塩害の複合劣化によってコンクリート構造物の劣化がさらに早くなることが考えられるが、コンクリート構造物の設計において複合劣化は考慮されていない。そのため、海洋構造物の寿命は想定よりも短くなる恐れがある。

本研究では溶脱したコンクリートの見かけの拡散係数を計測することによって、溶脱が塩害劣化速度に影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。また、塩害と溶脱の対策として高炉セメントを使用した炭酸化コンクリートに着目し研究を行った。

2. 試験概要

全ての試験ケースにおいて、水セメント比 40%、細骨材率 42.6%、目標スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とし、セメント種（高炉セメント B 種：BB、普通ポルトランドセメント：N）2 種類のコンクリートを作製した。表 1 に配合を示す。試験体の形状は、直径 100mm、高さ 50mm の円柱とした。細骨材として掛川産山砂を、粗骨材として青梅産砕石を用いた。

3. 実験概要

3.1 溶脱促進試験

JSCE-G571 に示される電気泳動セルに設置した試験体に電位勾配を与え、溶脱を促進させた。電圧は 35V とし、試験期間は 14 日とした。また、Ca の溶解状況を調査するため、陰極側セル内の Ca²⁺イオン濃度を原子吸光度法によって測定した。また、熱分析によって溶脱前後のコンクリート表面の試料に含まれる Ca(OH)₂、CaCO₃ の定量を行なった。

3.2 電気泳動試験

JSCE-G571 に基づいて電気泳動試験を行なった。電気泳動試験によって塩化物イオンの実効拡散係数を測

定し、塩化物イオンの見かけの拡散係数を算定した。

3.3 空隙率試験

試料を 10mm 程度に破碎し、空隙量 P は飽和状態の試料の質量 W_s と体積 V_s、絶乾状態の試料の質量 W_d および水の密度 ρ_w を用い、下式により算出した。

$$P = \frac{W_s - W_d}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w}$$

4. 実験結果

4.1 溶脱促進試験

表 2 に原子吸光度法、表 3 に熱分析の試験結果を示す。BB 配合について、炭酸化養生は水中養生と比較してカルシウムの溶出が約 1/4 に抑えられた。また、N と比較して BB はカルシウムの溶出が 1/2 に抑えられた。

溶脱前後を比較すると、水中養生を行なったコンクリートは溶脱面において水酸化カルシウムの減少が確認された。炭酸化養生を行なったコンクリートの炭酸化部分では、炭酸カルシウムが約 13% 検出された。また、溶脱前後では水酸化カルシウム量がほとんど変化しないことが確認された。

表 1 コンクリート配合

セメント	単位量(kg/m³)				Ad(kg)	AE(kg)
	W	C	S	G		
BB	168	420	707	987	2.1	4.2
N	168	420	721	995	2.1	4.2

表 2 原子吸光度法の結果

使用セメント		BB 水中	BB 炭酸化	N 水中
カルシウム	mg(L)	439.1	118.1	897.2

表 3 熱分析の結果 単位 (mass%)

使用セメント	溶脱前		溶脱後	
	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
BB 水中	6.22		2.51	
BB 炭酸化	4.36	13.34	3.42	12.61
N 水中	5.48		0.04	

4.2 電気泳動試験

表 4 に電気泳動試験によって算出した塩化物イオンの見かけの拡散係数の値を示す。

水中養生の BB より炭酸化養生の BB の方が見かけの拡散係数が 3 倍以上大きい結果が得られた。また、水中養生の BB の拡散係数は、N の 1/25 以下となった。

4.3 空隙率試験

図 1 に空隙率試験の結果を示す。本実験では、溶脱させたコンクリートと溶脱させていないコンクリートの空隙率を測定した。水中養生を行なったコンクリートは、Ca(OH)₂ の溶脱によって空隙が増加したと考えられる。炭酸化コンクリートでは、CaCO₃ の生成によって緻密化したものと考えられる。

港湾空港技術研究所は、普通セメントコンクリートの空隙率から拡散係数を求める近似曲線を提案している¹⁾。筆者は実構造物データ¹⁾から高炉セメントコンクリートの空隙率と拡散係数の回帰式を算出し評価に用いた。表 5 に空隙率から算出した見かけの拡散係数を示す。BB は溶脱によって見かけの拡散係数がほとんど変化しないことが確認できた。一方で、N は溶脱によって見かけの拡散係数の上昇が確認された。

4.4 寿命予測

2 次元 FEM 解析ソフト LIFE D. N. A.²⁾を用いて寿命予測を行なった。図 2 に解析モデルを示す。1 メッシュを 5mm とした。表面塩化物イオン濃度は飛沫帯を想定し 13kg/m³ とした。また、腐食発生限界濃度は 2.0kg/m³ とした。溶脱深さは 5mm とし、拡散係数は空隙率から算出した値を用いた。鉄筋のかぶり厚は 50mm とした。

表 6 に解析で求めた構造物の耐用年数を示す。水中養生を行なったコンクリートは、溶脱によって空隙が上昇したことで 11～17% 耐用年数が短くなった。炭酸化コンクリートは空隙率にほとんど差が見られず、溶脱前後で耐用年数にも差が見られなかった。

5. まとめ

炭酸化コンクリートは、水中養生を行なったコンクリートと比較して、溶解度の低い炭酸カルシウムによってコンクリートが緻密化したことで溶脱に対する抵抗性が高まったと考えられる。

溶脱と塩害の複合劣化について評価を行なった結果、水中養生を行なったコンクリートは水酸化カルシウムが溶脱し、空隙率が増加することで塩害の進行が早くなる可能性がある。一方で、炭酸化コンクリート

表 4 見かけの拡散係数 (cm²/年)

ケース	BB 水中	BB 炭酸化	N 水中
拡散係数	0.022	0.085	0.582

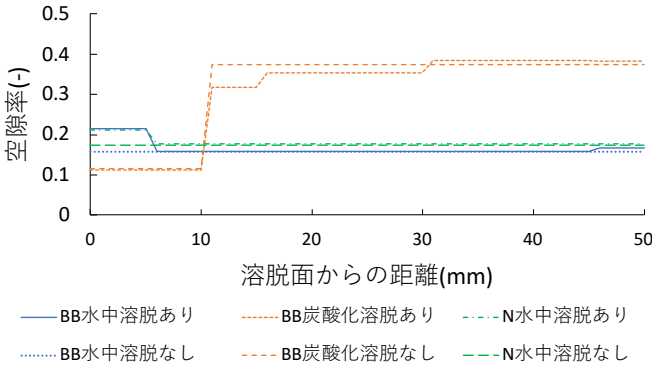


図 1 空隙率試験結果

表 5 見かけの拡散係数 (cm²/年)

溶脱促進日数	BB 水中	BB 炭酸化	N 水中
0 日	0.082	0.195	0.812
14 日	0.087	0.190	0.900

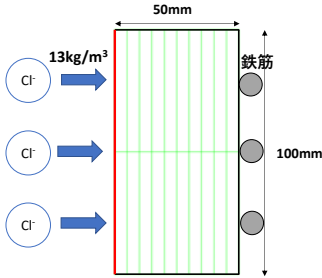


図 2 一次元方向解析モデル

表 6 耐用年数算定結果

使用セメント 養生方法	耐用年数 (年)		変化率 (%)
	溶脱なし	溶脱あり	
BB 水中	48.7	44	10.7
BB 炭酸化	32.6	33.7	-3.3
N 水中	4.8	4.1	17.1

は溶脱によるコンクリートの空隙率がほとんど変化しなかったため、複合劣化が生じにくいと考えられる。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21014) を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果である。

参考文献

1) 山路徹、中野松二、浜田秀則：港湾 RC 構造物における塩化物イオン拡散係数調査結果および簡易推定手法に関する検討、港湾空港研究所 資料 1141、pp. 11 (2006)

2) 取達剛、横関康祐、武地真一：コンクリート構造物の耐久性性能評価ツール LIFED. N. A. 鹿島技術研究所年報、第 57 号、pp. 73-78, 2009