

各種暴露コンクリートの画像解析による空隙構造評価と塩化物イオン拡散係数との関連性

長岡技術科学大学 学生会員 ○神田 麻衣子 正会員 下村 匠
太平洋セメント(株) 非会員 高橋 晴香 正会員 細川 佳史 山田 一夫

1. はじめに

鉄筋コンクリートにおける劣化現象の一つである塩害による鉄筋腐食は、塩化物イオン(以下 Cl^- と記述)の浸入により促進される。 Cl^- の浸入速度は、水和物による Cl の固定化と、 Cl の移動経路となる空隙構造の複雑さの違いにより変化する。後者の空隙構造の複雑さの影響に関しては、電気泳動法を用いて求められる実効拡散係数などがその定量的指標になり得る。一方、近年開発が進められている画像解析技術により、電子顕微鏡で得られたコンクリートの断面の反射電子像から、サブミクロンオーダーの空隙を抽出することができるようになってきている。この像を画像解析ソフトで処理することにより、空隙構造を直接定量化することも期待されている。

このような背景から、本研究では、画像解析によるコンクリートの空隙構造の複雑さの評価を試みた。空隙構造の複雑さの評価指標として、本研究では空隙の比表面積を用いることを検討した。さらに、同様に空隙構造の複雑さの指標である実効拡散係数と比較することにより、本研究で用いた手法の妥当性を検証した。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

コンクリートの空隙構造に影響を与える要因として、セメントの種類と水セメント比(W/C)の2つが挙げられることから、試験の組み合わせは、W/C=40%の普通ポルトランドセメント(以下 N と記述)、高炉セメント B 種(以下 BB と記述)、普通エコセメント(以下 EC と記述)の3水準と、W/C=50%の N と EC の2水準を

用いた。BB については、N に対し高炉スラグ微粉末を内割りで 40%添加して調製した。使用した各セメントの化学分析値、密度は表-1 に示す通りである。

表-2 にコンクリートの配合を示す。暴露コンクリートは、4 週間標準水中養生したコンクリート試験体を 20℃室内にて 3%NaCl 水溶液に 2 年間浸せきしたものである。

表-2 配合表

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
40	46.0	4.5	160	400	799	975
50				320	830	1011

2.2 試料の作製と反射電子像の観察

暴露コンクリートをダイヤモンドカッターにて 1.5cm 角に切り出し、D - 乾燥させた後、常温硬化型の低粘性エポキシ樹脂に含浸させた。樹脂が硬化した後、表面を SiC およびアルミナ粉末とケロシンを用いて研磨し反射電子像観察用の試料を作製した。また、試料に導電性を付加するため、試料表面にカーボン蒸着を施した。

試料の観察には、反射電子検出器を付属した走査型電子顕微鏡(日本電子社製 JSM-7001F)を用いた。観察条件は、加速電圧 15 kV、ワーキングディスタンス 10mm、観察倍率 500 倍とした。

1 視野あたりの観察範囲は 240 μm × 170 μm で、2560 × 1920 画素(1 画素あたり 0.09 μm)のセメントペースト部の反射電子像を取得した。

取得した画像は、画像処理ソフト(ナノシステム社製

表-1 セメントの化学分析値と密度

Cement	化学分析値(mass%)									密度 (g/cm ³)
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
N	0.66	21.49	5.41	2.88	64.76	1.02	1.78	0.10	0.37	3.16
BB	0.62	25.86	8.30	1.90	55.72	3.23	2.33	0.07	0.34	3.04
EC	1.51	16.62	7.30	3.51	60.60	2.16	3.98	0.41	0.05	3.17

キーワード 反射電子像, 画像解析, 暴露コンクリート, 比表面積, 実効拡散係数

連絡先 長岡技術科学大学 建設系 コンクリート研究室 TEL 0258-47-1611(内線 6310)

NanoHunter NS2K-Pro)を用いて空隙の2値化(白と黒の画像にすること)処理を行い、図-1のように空隙のみの相と他の相とを分離した。ここで、試料作製時に入ったと思われるひび割れは、画像処理の過程ですべて除去して空隙のみを抽出した。

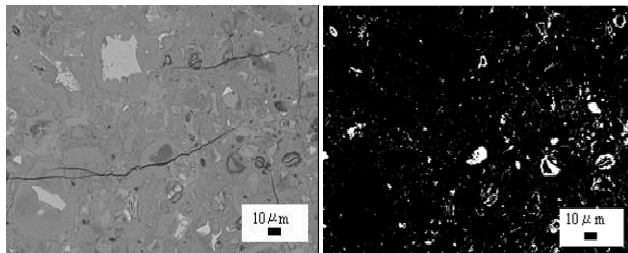


図-1 反射電子像と空隙の2値化像(倍率500倍)

作製した空隙の2値化像を用いて、空隙の比表面積 Sp [m^{-1}]を算出した。空隙の比表面積とは、空隙の単位体積あたりの空隙の表面積として定義される。これは空隙の単位面積あたりの周囲長と同義であり、式(1)より求められる。 Sp は動水半径の逆数に等しく、空隙の複雑性を表すことが可能である。

$$Sp = \frac{4 \sum \Gamma}{\pi \sum A} \quad (1)$$

ここに、 Γ :空隙の周囲長 [m], A :空隙の面積 [m^2]

以上により求められた各種コンクリートにおける空隙の比表面積について相互に比較した。また、実効拡散係数は電気泳動法(電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G571-2007))により求め、空隙率は、飽水(真空飽水処理)および絶乾(105℃乾燥)状態の硬化体の密度差から求めた。

3. 結果および考察

3.1 各種コンクリートと比表面積

画像解析により求められた空隙の比表面積 Sp を図-2に示す。 $W/C=40\%$ において、セメント種類が異なる場合の比表面積を比較すると、EC, N, BBの順に Sp が大きくなる結果となった。一方、同一のセメント

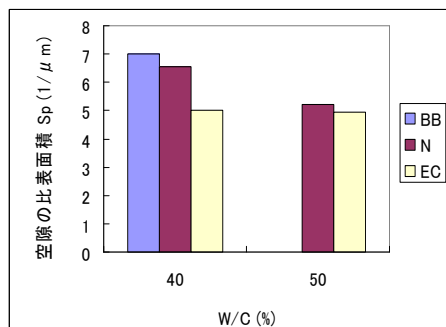


図-2 各種コンクリートの空隙の比表面積

について W/C の影響をみると、 $W/C=40\%$ の方が Sp は大きくなった。したがって、空隙の複雑さは、今回のセメント種類で比べると、EC, N, BBの順に複雑になり、また、 W/C が小さいほど複雑になる傾向が認められた。

3.2 実効拡散係数と比表面積の関係

画像解析により求められた空隙の比表面積と、実効拡散係数 De をコンクリートの空隙率 ε で除した値 De/ε との関係を図-3に示す。ここで、 De を ε で除したのは、 De に内包される空隙率の影響をキャンセルするためである。これまでの研究では、モルタル研磨面の反射電子像から得られた空隙の比表面積と、酸素の拡散係数との間には負の相関性があることが分かっている¹⁾。本研究において得られた実効拡散係数と、空隙の比表面積との間には負の相関性が得られ、その回帰曲線は既往の研究と同じように累乗関数となった。したがって、実効拡散係数と空隙の比表面積の間には明確な相関性があることが分かった。また、その相関性はセメントの種類や W/C の違いに影響されないことも明らかとなった。

以上の結果から、画像解析によって得られた空隙の比表面積は、空隙の複雑さを定量的に評価する指標として妥当であり、本手法は暴露コンクリートの塩分浸透性を適切に評価し得るものと考えられた。

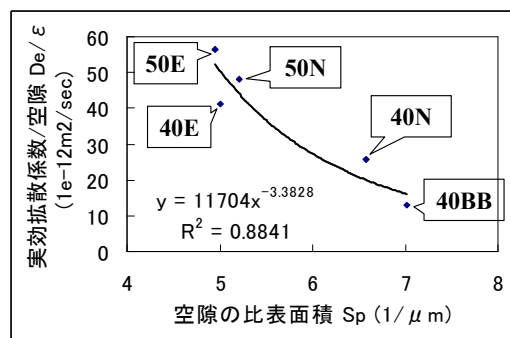


図-3 実効拡散係数と空隙の比表面積

4. まとめ

本研究では、空隙構造の複雑さを表す指標として空隙の比表面積を求め、実効拡散係数との比較を行った。その結果、空隙の比表面積は空隙の複雑さを定量的に評価する手法として妥当であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) H.S.Wong, N.R.Buenfeld, M.K.Head: Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images, Cement and Concrete Research 36, pp.1556-1566, 2006