

各種測定法により評価した高炉スラグ・メタカオリン混入コンクリートの 塩化物イオン浸透性状

太平洋セメント(株) 中央研究所 正会員 ○細川佳史
太平洋セメント(株) 中央研究所 正会員 山田一夫
(株)太平洋コンサルタント 研究センター 山本正義

1 はじめに

浸せき法によるコンクリートのみかけの塩化物イオン (Cl^-) 拡散係数 (以下単に拡散係数) 試験では、コンクリート表面から浸透した Cl^- の濃度プロファイルから拡散係数が求められるが、濃度プロファイルを測定する際の分析試料のサンプリング間隔は拡散係数の算出結果に影響を及ぼすことが知られている¹⁾。ここでは、高炉スラグ、メタカオリンなどの遮塩性を高める混和材を混入したコンクリートについて、サンプリング間隔が異なる 3 つの手法、スライス法 (10mm 前後)、研削法 (1mm 以上)、EPMA 法 (0.01mm 以上) により Cl^- 濃度プロファイルを求めて得られる拡散係数に関し、サンプリング方法の影響、ならびに各混和材を使用したコンクリートの Cl^- 浸透性状を検討した。

2 実験概要

2.1 供試体作製方法

試験に供したコンクリート配合を表 1 に示す。本配合では 28 日圧縮強度 σ_{28d} が一定となるよう水粉体比 W/P を設定した。使用したセメントは普通ポルトランドセメント (OPC) および低熱ポルトランドセメント (LHC) である。高炉スラグ (SG) およびメタカオリン (MK) の添加率は、それぞれセメント質量に対し内割りで 40%、10%とした。試験体形状は 10×10×40cm 角柱供試体とし、打設・脱型後、材齢 28 日まで標準水中養生を行い、そののち気中 (20℃, RH60%) で 7 日間養生した。養生後、打設方向に平行の 10×40cm の面を暴露面とし、その他の面についてはエポキシ樹脂を塗布してシールし、NaCl3%溶液に浸せき (20 週間) した。なお、 σ_{28d} の測定値は 38.6~43.5MPa の範囲にあったことから、本実験で作製した供試体はほぼ強度一定であることが確認された。

2.2 Cl^- 濃度プロファイル測定方法

2.2.1 スライス法および研削法

暴露後の角柱供試体から適当量のコンクリート塊を採取し、ダイヤモンドカッター (刃厚約 1mm) を用いて暴露面に平行に 8mm 間隔にコンクリート塊をス

ライスし、ディスクミルで粉砕して分析用粉末試料を得た。一方、研削法は、ダイヤモンド研削ディスクを用いて、暴露面に平行に 2mm 間隔でコンクリート塊を研削し分析用粉末試料を得た。上記の方法により暴露面から各深さにおいて得られた試料は、「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法 (JCI-SC4)」に準拠して全 Cl^- 濃度を測定した。

2.2.2 EPMA 法

暴露後の角柱供試体より適当量採取したコンクリート塊から、 Cl^- の浸透方向と平行な面および暴露表面を有する板状試料を採取し、研磨・炭素蒸着して EPMA による Cl および CaO の面分析を行った。

2.3 拡散係数および表面濃度の算出

得られた濃度プロファイルについては、拡散方程式 (Fick の第 2 法則) の解析解である式[1]を、Marquardt 法による非線形最小二乗法を用いてフィッティングさせることにより、各プロファイルの拡散係数 D および表面濃度 C_0 を算出した。

$$C(x,t) = (C_0 - C_i) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + C_i \quad [1]$$

ここに、 $C(x,t)$:深さ $x(\text{cm})$, 時刻 $t(\text{sec})$ における全 Cl^- 濃度(%), C_0 :表面における全 Cl^- 濃度(%), D :拡散係数 (cm^2/sec), erfc :補誤差関数, である。

3 結果及び考察

図 1 に、配合 N について各測定法により求めた全 Cl^- 濃度プロファイルを示す。なお、図中の曲線は、プロファイルフィッティングにより得られた式[1]を示したものである。この図から分かるように、研削法によって得られる全 Cl^- 濃度は、スライス法とほぼ同様な値となった。一方、EPMA 法による全 Cl^- 濃度が他に

表 1 コンクリート配合

記号	セメント 種類	添加率 (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)			
					W	C	SG	MK
N	OPC	0	51.6	48.0	170	329	-	-
L	LHC		44.7	47.0	160	358	-	-
NSG	OPC	40	51.6	48.0	170	197.4	131.6	-
LSG	LHC		44.7	47.0	160	214.8	143.2	-
NMK	OPC	10	51.6	48.0	170	296.1	-	32.9

キーワード：塩化物イオン拡散係数、高炉スラグ、メタカオリン、スライス法、研削法、EPMA

〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 Tel:043-498-3909 Fax:043-498-3849

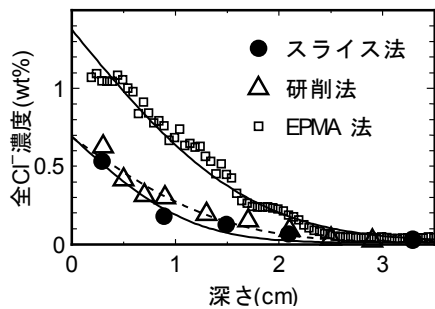


図1 各測定法により求めた Cl^- 濃度プロファイル (配合N)

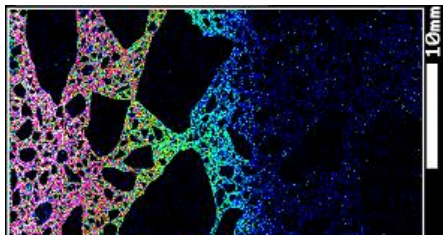


図2 EPMAによるClの面分析結果 (配合N)

比べ高くなっているが、これは、以下に述べる EPMA 法に特有のプロファイル測定法に由来した現象である。

図2はEPMAによる配合NのCl面分析結果であり、図の左端が Cl^- 浸透面に相当する。面分析結果から濃度プロファイルを求めるには、図2の水平方向の各深さにおいて鉛直方向の全 Cl^- 濃度を平均化すればよいが、骨材の偏在によるペースト領域のばらつきが全 Cl^- 濃度の平均値に影響するので、Clと同時に測定した CaO 濃度が6.25wt%以下の領域を骨材と判断して平均化の計算から除外した。この操作により、EPMAによる全 Cl^- 濃度は、ペースト相のみを対象とすることになり、コンクリート全体を考えるスライス法や研削法の全 Cl^- 濃度よりも大きくなる。

EPMA法で測定された値はコンクリートに対する全 Cl^- 濃度ではないが、式[1]に基づき求められる拡散係数は表面に対する濃度比によって決定され、 Cl^- 濃度の絶対値には依存しないので、各測定方法によって得られた拡散係数の値を相互に比較することは可能である。各測定法により得られた全 Cl^- 濃度プロファイルから最小二乗法によって推定した拡散係数 D とその推定誤差 $e(D)$ を表2に示す。

各測定方法によって得られた拡散係数は、スライス法、研削法、EPMA法の順に大きくなる傾向が認められた。一方、拡散係数の推定誤差は、EPMA法が他の方法に比べ著しく小さいことから、EPMA法による拡散係数が最も精度の高い値と言える。この推定誤差 $e(D)$ は、全 Cl^- 濃度の測定誤差および測定点数に依存して決まるが、各測定方法による測定誤差 (誤差分散) s^2 を、最小二乗フィッティングの結果を用いて式[2]で求めたところ、誤差分散 s^2 が EPMA 法の拡散係数の推

表2 各測定法による Cl^- 濃度プロファイルから求めた拡散係数とその推定誤差

記号	スライス法		研削法		EPMA 法	
	$D \times 10^{-8}$ (cm^2/sec)	$e(D)$	$D \times 10^{-8}$ (cm^2/sec)	$e(D)$	$D \times 10^{-8}$ (cm^2/sec)	$e(D)$
N	3.29	26.1%	5.59	21.49%	7.39	4.35%
L	4.84	3.8%	6.57	7.79%	8.98	4.67%
NSG	1.48	2.5%	1.12	6.31%	1.72	2.25%
LSG	1.55	16.3%	1.68	17.68%	2.36	1.70%
NMK	1.55	11.1%	2.29	8.83%	3.04	4.71%

定誤差 $e(D)$ を小さくする要因にはなり得ないことが判明した。したがって、EPMA法による拡散係数の推定誤

表3 EPMA法で求めた各混和材の拡散係数低減率

	N	L
SG	0.23	0.26
MK	0.41	

差 $e(D)$ が最も小さくなったのは、サンプリング間隔を細かくすることによって測定点数が他の方法より増大したことによるものと考えられた。

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(c_i - \hat{c}_i)^2}{n - m} \quad [2]$$

ここに、 s^2 : 誤差分散、 c_i : 測定値、 $\hat{c}_i$: 計算値、 n : 測定点数、 m : パラメータ数 (=2)

次に、材料種類が拡散係数におよぼす影響についてみると、SGおよびMKはいずれも拡散係数を低減する効果が認められた。ここで、混和材の遮塩性を定量的に示す指標として、混和材を添加したコンクリートの拡散係数を無混和の値で除した拡散係数低減率²⁾を定義する。SG、MKの拡散係数低減率をEPMA法により求めた拡散係数から算出した結果を表3に示す。この表から、40%添加したSGの拡散係数低減率は10%添加したMKの約1/2となること、また、拡散係数低減率は基材セメント種類の影響を受けないことが認められた。このことから、同添加率であればMKはSGの2倍の遮塩性を示すものと類推される。

4 まとめ

- 1) EPMA法では、細かい間隔のサンプリングが可能で測定点数が多くなるため、全 Cl^- 濃度プロファイルから算出される拡散係数が、他の方法よりも高い精度となる。
- 2) EPMA法で得られた拡散係数から各混和材の拡散係数低減率を算出した結果、40%添加したSGの拡散係数低減率が10%添加したMKの約1/2倍で、拡散係数低減率は基材セメント種類の影響を受けないことが認められた。

参考文献

- 1) P. McGrath: Development of test methods for predicting chloride penetration into high performance concrete, Ph.D. Thesis, University of Toronto, 1996
- 2) SORN Vira 他: フライアッシュコンクリート中への塩化物イオン浸透性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, no.1, pp.603-608, 2002