

電氣的促進試験法による高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオン拡散係数の算定

金沢大学大学院 学生員 佐藤 健一 金沢大学工学部 正会員 鳥居 和之
金沢大学工学部 学生員 小山 徳之 金沢大学工学部 フェロー 川村 満紀

1. まえがき

塩分環境下の鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計および維持管理法を検討する際に、塩化物イオンの拡散係数は重要な指標の一つになる。塩化物イオンの拡散係数の試験法に関して、従来からの濃度勾配を駆動力とする拡散セル法では多くの労力と時間が必要であるため、現在、急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T277) を改良した方法として、直流電圧下で拡散セル間を移動する塩化物イオンのフラックスから塩化物イオンの拡散係数を算定する方法が提案されている^{1), 2)}。

本研究は、塩化物イオンの促進透過性試験により高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオンの拡散係数を調べるとともに、このような方法で求めた塩化物イオンの拡散係数と急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T277) の結果との対応関係について実験的に検討を行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 試験体の作製

本研究で用いた高炉スラグ微粉末コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(比重:3.16, プレーン値:3300cm²/g, 略号:OPC)を使用し、コンクリートの水結合材比は0.35および0.55の2種類とし、高炉スラグ微粉末(比重:2.89, プレーン値:4300cm²/g, 略号:BFS)の重量置換率を30%, 50%および70%と変化させた。塩化物イオンの透過性試験に用いた試験体は、所定材令まで水中養生を継続したものであり、側面をエポキシ樹脂で被覆し、真空飽水を施した後に試験に供した。

表-1 コンクリートの配合

スラグ [*] 置換率	W/B	単位量 (kg/m ³)					スラング [*] (cm)	空気量 (%)	f' 28 (MPa)
		W	C	BFS	S	G			
0.35	OPC	165	471	0	626	1058	15.5	5.5	47.9
	BFS30%	165	330	141	622	1052	13.5	5.0	56.0
	BFS50%	165	236	236	619	1047	9.5	3.3	59.0
	BFS70%	165	141	330	617	1042	16.0	3.5	43.5
0.55	OPC	165	300	0	752	1074	12.5	5.4	23.8
	BFS30%	165	210	90	749	1069	9.0	4.4	22.2
	BFS50%	165	150	150	748	1068	10.0	4.0	24.7
	BFS70%	165	90	210	745	1065	12.5	3.1	22.7

2. 2 促進透過性試験の概要

塩化物イオンの促進透過性試験は、拡散セル(容量:785ml, 負極側:3%のNaCl溶液, 正極側:0.3NのNaOH溶液)の間に配置した試験体(φ10cm×3cm)に3V/cmの直流電圧を付加し、負極側から正極側のセルへ移動した塩化物イオンの濃度変化をイオンクロマトグラフィーで測定することにより行った。この際に、塩化物イオンの移動は電位勾配に比例し、濃度勾配による移動は無視できるものと仮定して、Nernst-Planksの式が適用できる初期の直線部分の傾き(塩化物イオンの移動度(J_{Cl}))より、以下に示す式で塩化物イオンの拡散係数(D_{Cl})を算定した。

$$D_{Cl} = \frac{RT}{Z_{Cl} \cdot F \cdot C_{Cl} \cdot \Delta V} J_{Cl} \quad (\text{cm}^2/\text{sec})$$

(R: 気体定数, T: 絶対温度, Z_{Cl}: 塩化物イオンの電価, F: ファラデー定数, C_{Cl}: 拡散セルの塩化物イオン濃度, ΔV: 電位勾配)

一方、急速塩化物イオン透過性試験(AASHTO T277)は、φ10cm×5cmの試験体に60Vの直流電圧を付加し、6時間の間に流れた電流量(クーロン)により塩化物イオン透過性を評価した。

表-2 塩化物イオンの拡散係数および透過開始日数

スラグ [*] 置換率	W/B	塩化物イオンの拡散係数 (cm ² /sec)		
		7日材令	28日材令	91日材令
0.35	OPC	1.610×10 ⁻⁸ [5]	1.303×10 ⁻⁸ [8]	1.241×10 ⁻⁸ [11]
	BFS30%	6.332×10 ⁻⁹ [7]	4.973×10 ⁻⁹ [23]	4.317×10 ⁻⁹ [36]
	BFS50%	3.529×10 ⁻⁹ [13]	6.636×10 ⁻⁹ [15] ※	4.196×10 ⁻⁹ [28] ※
	BFS70%	—	2.725×10 ⁻⁹ [22] ※	1.896×10 ⁻⁹ [38] ※
0.55	OPC	3.649×10 ⁻⁸ [3]	2.814×10 ⁻⁸ [5]	3.322×10 ⁻⁸ [5]
	BFS30%	2.696×10 ⁻⁸ [3]	1.750×10 ⁻⁸ [8]	1.728×10 ⁻⁸ [10]
	BFS50%	1.616×10 ⁻⁸ [4]	1.162×10 ⁻⁸ [16]	5.192×10 ⁻⁹ [16]
	BFS70%	4.804×10 ⁻⁹ [4]	3.038×10 ⁻⁹ [32]	3.186×10 ⁻⁹ [50]

[] : 塩化物イオンの透過開始日数

※: 電位勾配を5V/cmで実施したもの

表-2に高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオンの拡散係数および透過開始日数を示す。高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオンの拡散係数は、10⁻⁹~10⁻⁷cm²/secの範囲にあり、水結合材比や高炉スラグ置換率の影響が明確に反映されていた。高炉スラ

グ微粉末の使用による塩化物イオン透過性の改善効果はかなり顕著であり、高炉スラグ微粉末コンクリート ($W/B=0.55 \cdot BFS50\%$) の塩化物イオンの拡散係数は普通セメントコンクリート ($W/C=0.35$) よりも小さくなった。また、高炉スラグ微粉末コンクリート ($W/B=0.35 \cdot BFS50\%$, $BFS70\%$ のもの) は、材令7日より非常に小さな塩化物イオン透過性を示した。このため両コンクリートに関しては、材令28日以後、電位勾配を $3V/cm$ から $5V/cm$ に増加させて試験を実施したが、この際の塩化物イオンの拡散係数は予想された値を上回るものとなった。これは、付加電圧の上昇によるジュール熱の発生に付随してコンクリートの電気抵抗性が低下することや塩化物イオンの電気的な泳動が電位勾配とともに活性化されることが原因であると考えられた³⁾。本試験法の結果より、コンクリートに与える電位勾配としては $3V/cm$ が適当であると判断された。

3. 2 急速試験法 (AASHTO T277) により求めた塩化物イオン透過量(クーロン)の経時変化

図-1 に急速塩化物イオン透過性試験 (AASHTO T277) により求めた塩化物イオン透過量(クーロン)の経時変化を示す。高炉スラグ微粉末コンクリートでは、水結合材比が小さく、高炉スラグ置換率が高いものほど塩化物イオン透過量(クーロン)が小さくなり、材令の経過にともない塩化物イオン透過量が減少した。一般に、塩化物イオンの浸透を抑制するためには、水セメント比を小さくすることが基本となるが、高炉スラグ微粉末コンクリートでは水結合材比よりも高炉スラグ置換率による影響が顕著であり、適切な高炉スラグ置換率を選択することにより効果的に塩化物イオン透過性を抑制できることが示された。

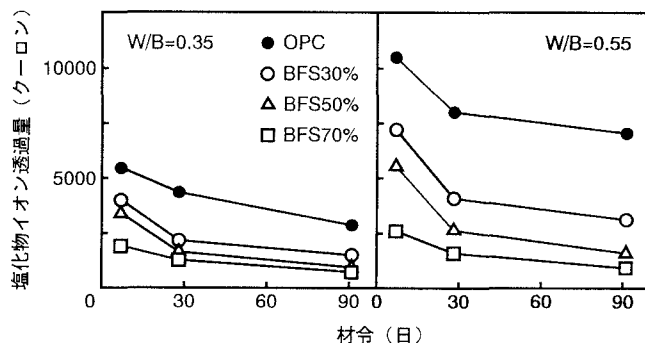


図-1 塩化物イオン透過量の経時変化 (AASHTO T277)

3. 3 塩化物イオン透過量(クーロン)と塩化物イオンの拡散係数との関係

図-2 に塩化物イオン透過量と塩化物イオンの拡散係数との関係を示す。両者の相関性は、高炉スラグ微粉末コンクリートよりも普通セメントコンクリートにて明確であり、とくに普通ポルトランドセメントコンクリートでは、急速試験法の結果より実際の塩化物イオンの拡散係数が精度良く推定できることが分かる。それに対して、高炉スラグ微粉末コンクリートの相関性が小さくなるのは、急速試験法 (AASHTO T277) の結果に高炉スラグ微粉末の使用によりコンクリートの電気抵抗性が大きく変化することが反映されているためであり、この結果からも、高炉スラグ微粉末コンクリートについては AASHTO T277 の評価基準自身の見直しも必要であると考えられる。

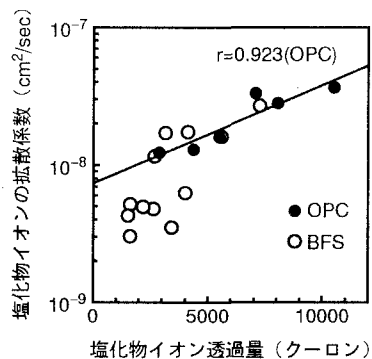


図-2 塩化物イオン透過量と塩化物イオンの拡散係数との関係

4. 結論

本実験の結果より、塩化物イオンの促進透過性試験により、高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオンの拡散係数を精度良く算定できることが確認された。また、高炉スラグ微粉末コンクリートでは、水結合材比の大きなものでも高炉スラグ置換率および養生期間を適切に選択することにより普通セメントコンクリートと比較して塩化物イオンの拡散係数を大きく低減できることが明らかとなった。さらに、本試験法より求めた塩化物イオンの拡散係数の値は急速試験法の結果とも比較的良好な対応関係があった。

【参考文献】

- 1) Gjrv. O. E. : ACI SP-144, pp. 545-574, 1995
- 2) 鳥居 和之 他 : コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 1, pp. 951-956, 1996
- 3) 長岡 寛 他 : 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V-141, pp. 282-283, 1995