

V-120

塩害環境下におけるフライアッシュコンクリートの性能評価

群馬大学工学部 学生会員 村田 陽子

群馬大学工学部 正 会 員 杉山 隆文

群馬大学工学部 正 会 員 辻 幸和

1. はじめに

フライアッシュを混和したコンクリートは、これまでの暴露実験の結果などから、塩化物イオンの浸透性に対する抑制効果が大きいと報告されている。しかし、フライアッシュのように長期にかけてポゾラン反応が継続して、コンクリートの細孔構造が変化する場合には、材齢が大きくなるほど抑制性能が発揮されると考えられる。

本研究では、電気化学的手法を用いた室内実験から、材齢が 400 日までのフライアッシュコンクリートの塩化物イオン拡散係数を求めた。そして、材齢に伴う拡散係数の減少をモデル化して、20 年後の塩分浸透性状を解析的に調べた。

2. 室内実験の概要

2. 1 供試体の作製

実験に用いたフライアッシュコンクリート(FA30)の配合を表 1 に示す。本研究では、FA30

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					空気量調整剤 添加率 ×10 ⁻² (%)*	減水剤添加率 ×10 ⁻² (%)*
					水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材		
FA30	55	30	20	42	178	227	97	734	1025	6.0	29
AE-Con		0		44	179	326	0	772	988	0.7	25

*セメント質量に対する割合

の塩分浸透に対する抑制効果を検討するために、フライアッシュを用いないコンクリート(AE-Con)の試験も行った。水中養生の日数は、28 日から最大 400 日までとした。

2. 2 試験の概要

電気化学的手法を用いた試験方法の概要を図-1 に示す。所定の養生を終了した円柱供試体（φ=100mm）を厚さ 50mm にスライスして、更に、真空中水中養生を実施した後に試験装置内にセットした。本実験では、既往の研究¹⁾と同様に、電極間に 15V の電圧を印加した。また、その他の試験条件なども既往の試験と同じである。測定項目は、陽極側へ電気的泳動した Cl⁻の濃度変化である。陽極側における Cl⁻濃度の経時的な増加が一定に達した段階で、コンクリート中の Cl⁻の移動は、定常状態に達したと判断した。そして、その濃度増加の割合からフラックスを求めた。試験は、恒温恒湿室内（温度：25℃、湿度：55%）で行った。

2. 3 拡散係数の算定

コンクリートの塩化物イオン拡散係数は、次式から算定した¹⁾：

$$D_{Cl} = \frac{RT}{Z_{Cl}FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)/L} J_{Cl} \quad (1)$$

ここに、 D_{Cl} ：塩化物イオン拡散係数（m²/s）、 R ：気体定数（8.314J/mol・K）、 T ：絶対温度（298K=25℃）、 J_{Cl} ：定常状態における塩化物イオンのフラックス（mol/m²・s）、 Z_{Cl} ：塩化物イオンの電荷、 F ：ファラデー定数、 C_{Cl} ：陰極側の塩化物イオン濃度（0.5mol/L）、 ΔE ：電位差（15V）、 ΔE_c ：電極における接触電位、 L ：供試体の厚さ（5cm=0.05m）

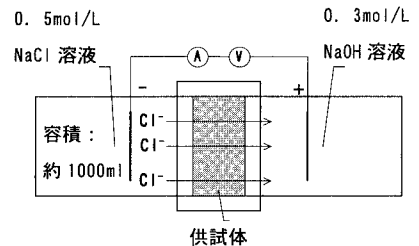
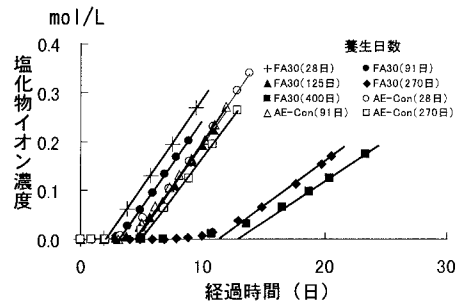


図-1 実験装置の概略図

図-2 陽極側の Cl⁻濃度の経時変化

キーワード：フライアッシュ、塩化物イオン、拡散係数、電気化学的手法

連絡先：〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 Tel 0277-30-1613 Fax 0277-30-1601

3. 室内実験の結果

図-2に陽極側濃度の経時変化を示す。FA30では、養生日数が増加するに従い、定常状態に達するまでの時間が増加して、直線の傾き（濃度増加の割合）は減少している。表-2は、図-2の結果から式（1）を用いて算定した拡散係数である。養生日数が増加するとFA30の拡散係数は、AE-Conよりも小さくなっている。したがって、フライアッシュコンクリートの塩分浸透性は、空隙の連続性などの物理的な要因によって抑制されていることが推察される。

4. 塩分浸透解析の概要

4. 1 拡散係数の減少のモデル化

表-2の結果から、材齢の増加に伴う拡散係数の減少を定式化して、400日以降の拡散係数の減少を求めた。その結果を図-3に示した（モデル式を図中に示した）。

4. 2 塩分浸透解析および考慮したパラメータ

解析では、細孔溶液中の Cl^- が拡散と固定化を繰り返しながら移動するとした²⁾。細孔溶液中の Cl^- の拡散解析は、次式で行った：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \begin{matrix} C=0 (t=0, x>0) \\ C=C_s=0.51\{1-\exp(-0.65t)\} (t>0, x=0) \end{matrix} \quad (2)$$

ここに、 C ：細孔溶液中の Cl^- 濃度（mol/L）、 D ：コンクリートの拡散係数（ m^2/s ）、 t ：時間（s）、 x ：距離（m）

境界条件の設定では、常時海中にあるとしたので、各コンクリートは同一の境界条件とした。したがって、空隙は常時飽和状態と仮定した。また、拡散係数は、図-3に示すように経時的に減少するとした。図-4は、既往の実験データ¹⁾に基づいて求めた空隙率の経時的な減少のモデル化である。長期材齢では、FA30とAE-Conではほぼ等しく、0.14程度である。また、図-5は、既往の文献データ²⁾から求めた、 Cl^- 濃度と固定化塩分量 C_b の関係である（モデル式を図中に示した： W_{gel} は水和物の総量）。解析は、有限差分法の陽解法により行った。

5. フライアッシュコンクリートの性能評価

図-6は、暴露6ヶ月後および20年後の全塩分量の浸透分布である。6ヶ月では、FA30の分布はAE-Conとほぼ同じであるが、暴露期間が20年に増加すると、FA30における塩分浸透は抑制されていることが解る。これらの結果は、FA30の拡散係数が材齢の増加に従い、空隙率ではなく、空隙の連続性の低下によって小さくなるためであると推察される。このように本解析の範囲内では、物理的な要因に関連する拡散係数が、フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響が大きいと考えられる。

6. おわりに

フライアッシュコンクリートの塩分浸透に対する抑制性能を室内実験における電気化学的手法に基づく試験、およびその結果を用いた塩分浸透解析から評価した。

表-2 拡散係数

養生日数	$D_{\text{Cl}} (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	
	AE-Con	FA30
28日	11.2	10.8
91日	10.2	10.5
270日	8.7	5.56
400日	—	4.36

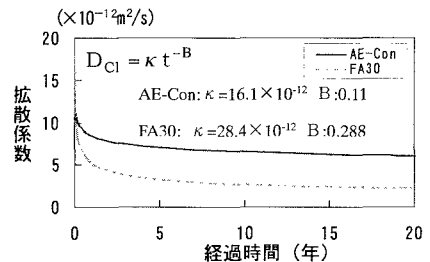


図-3 拡散係数と経過時間の関係

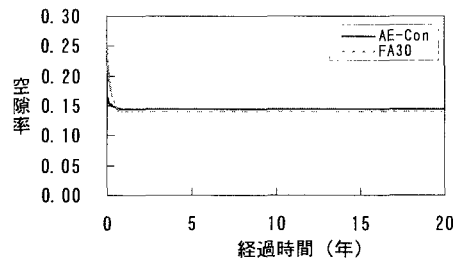


図-4 空隙率と経過時間の関係

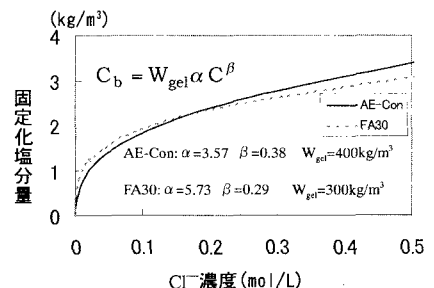


図-5 固定化塩分量と Cl^- 濃度の関係

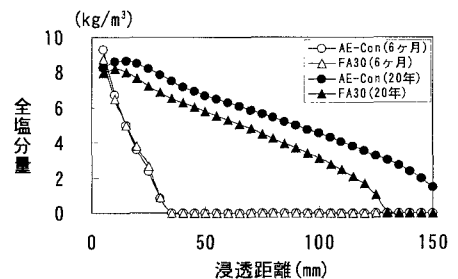


図-6 全塩分量と浸透距離の関係

参考文献 1) 杉山隆文他：第24回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp. 131～136，1997

2) Tang, Luping：Doctor Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden 1996