

LPC-FA 系コンクリートにおける塩分浸透性評価に関する研究

八戸工業高等専門学校 学生会員 ○ 馬渡大壮
正会員 庭瀬一仁
東北大学 正会員 皆川浩 宮本慎太郎 久田真

1. はじめに

コンクリート構造物に対する劣化事例が数多く報告されており，社会的問題となっている．劣化要因の一つである塩害や中性化への対策としては，コンクリート組織を緻密化し，外部からの劣化因子の侵入を抑制することが挙げられる．また，放射性廃棄物の処分における人工バリア等においても高緻密なセメント系材料が要求されており，低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを混合した（以下，LPC-FA 系）セメント材料¹⁾が着目されている．当研究では，LPC-FA 系コンクリートの物質透過性評価に資する基礎データを得るため，4プローブ法による電気抵抗率の測定，電気抵抗率から算出した推計拡散係数の取得，電気泳動による実効拡散試験を行った．

2. 試験概要

2.1. 供試体概要

LPC-FA 系コンクリートの示方配合を表-1 に示す．W/B を 40 %，50 %，60 % の配合を基にして，空気量を 2.5 %，5.0 %，7.5 % に調整し，合計 9 ケースの配合により φ100×200 mm の円柱供試体を作製した．その後，水中養生（20℃，水道水）を 1 年間行った．

2.2. 4 プローブ法による電気抵抗率の測定

4 プローブ法の測定概念図を図-1 に示す．4 プローブ法は，等しい間隔 *a* で並んだ 4 つの電極を測定対象面に押し当て，外側の電流電極から交流電極を印加し，測定対象に流した交流電流 *I* と電位差電極間の電位差 *V* の測定値と式(1)を用いて見掛けの電気抵抗率 ρ_{app} 求める方法である．

$$\rho_{app} = 2\pi a \cdot \frac{V}{I}$$

(1)

ここで測定した電気抵抗率を見掛けの電気抵抗率 ρ_{app} と呼称したのは，今回の実験のように測定対象が電極間隔と比較して相対的に小さく，半無限体と見なせない場合には，電極間隔，供試体寸法によってセル定数が変化し，真の電気抵抗率と異なる結果が得られるためである．本実験では，W/B = 75 % で空気量 5.0 % の供試体は円柱・φ100×200 mm であるので，供試体の側面部に電極を設置した．その他の供試体は φ100×200 mm のものを切断加工した円柱・φ100×50 mm であるので，供試体の上面部（円形部分）に電極を設置した．そのため，W. Morris ら²⁾によって検討された，円柱供試体に対して 4 プローブ法を用いた測定を行う際の補正係数や杉本らの既報³⁾を参考に，円柱供試体の寸法や測定位置に応じて補正係数を算出した．W/B= 75 % で空気量 5.0 % の供試体では補正係数を 1.6，その他の供試体では補正係数を 2.2 とし，4 プローブ法から得られた電気抵抗から真の電気抵抗率を算出している．なお，測定値は円柱供試体 4 か所を測定した平均値を用いた．

2.3. 空隙率およびコンクリート中のイオン濃度

重量差法によって供試体の空隙率を測定した．空隙水中の各種イオン濃度は，イオンクロマトグラフ法にて定量した Na⁺，K⁺，Cl⁻，SO₄²⁻ と，溶解度積および電気的中性条件より算出した Ca²⁺，OH⁻ に着目した．

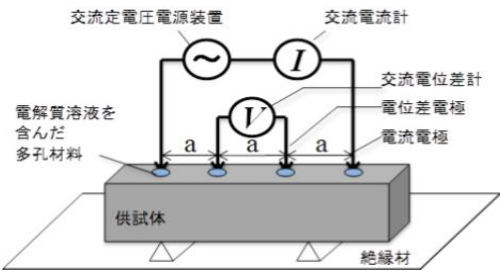


図-1 4 プローブ法概念図

表-1 示方配合表

W/B (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	Slump flow (cm)	Air (%)	単位量							
					W (kg/m³)	粉体P			S (kg/m³)	G (kg/m³)	SP (P × %)	AS (B × %)
						結合材B		LS (kg/m³)				
						LPC (kg/m³)	FA (kg/m³)					
45	20	53.4	65±5.0	2.5	160	249	107	178	883	780	0.95	-
				5.0								0.06
				7.5								0.15
60	20	53.4	65±5.1	2.5	156	186	265	265	886	780	0.95	0.005
				5.0								0.06
				7.5								0.03
75	20	53.4	65±5.2	2.5	155	148	318	318	887	780	0.95	-
				5.0								0.015
				7.5								0.09

ここで， LPC:低熱ポルトランドセメント FA:フライアッシュ LS:石灰石微粉末 SP:高性能 AE 減水剤 AS:空気量調整剤

キーワード：低熱ポルトランドセメント，フライアッシュ，実効拡散係数，電気抵抗率，推計拡散係数
〒039-1101 青森県八戸市田面木上野平 16-1 八戸工業高等専門学校コンクリート研究室 0178-27-7307

2.4. 電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係式

既往の研究⁴⁾に準じて、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係は式(2)のようになる。

$$D_{Cl} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{k \cdot T \cdot \left(1 - \ln 10 \times C_{Cl} \cdot \frac{0.51 \cdot Z_{Cl}^4}{4\sqrt{I} \cdot (1 + \sqrt{I})^2} \right)}{F \cdot e \cdot \sum_n \left(Z_n^2 \cdot \frac{B_n}{B_{Cl}} \cdot C_n \right)} \quad (2)$$

ここに、 D_{Cl} : 塩化物イオン拡散係数 (m^2/s)、 ρ : 電気抵抗率 (Ωm)、 k : ボルツマン定数 ($=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、 T : 絶対温度 (K)、 C : イオン濃度 (mol/m^3)、 Z : イオンの価数、 I_s : イオン強度、 F : ファラデー定数 ($=9.65 \times 10^4 \text{ C/mol}$)、 e : 電気素量 ($=1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$)、 n : イオンの種類、 B : 工学的絶対移動度 ($\text{m N}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

2.5. 塩化物イオンの実効拡散係数

電気泳動試験では JSCE-G571-2013 に準拠し、 D_e を算出した。なお、供試体の寸法は $\phi 100 \times 50 \text{ mm}$ とした。

3. 結果と考察

図-2 に真の電気抵抗率と各配合における空隙率の関係を示す。図-2 より、空隙率の増加に伴って電気抵抗率が小さくなる傾向が見られた。このことから、電気抵抗率は組織の緻密度によって影響を受けることが考えられる。また、低 W/B の配合ほど空隙率は小さくなっている傾向が得られ、空隙率に対してはフレッシュ時の空気量よりも W/B の影響が支配的であることがわかる。

皆川ら⁴⁾によって研究された普通ポルトランドセメントを使用したセメントコンクリートにおいて測定した例では、電気抵抗率は $50 \sim 400 \Omega \text{m}$ であるのに対し、当実験で測定した電気抵抗率は $600 \sim 1200 \Omega \text{m}$ 程度と、大きく上回る結果となった。これは、結合材として低熱ポルトランドセメント、混和材としてポゾラン反応を有するフライアッシュを使用し、一年間の水中養生を行ったことによって、セメントペースト部や骨材界面の組織が緻密化し、交流電場において電流の媒体となるイオンの移動が妨げられたことが理由として考えられる。また AASHTO Designation:TP-11 で判断される当実験での LPC-FA 系コンクリートの塩分浸透性は「Very low」あるいは「Negligible」相当であった。ここでは、AASHTO Designation:TP-11 の値は前述と同様に電極間隔や供試体寸法等に応じて真の電気抵抗率に補正したものをを用いている。

図-3 に D_{Cl} 、 D_e と空隙率の関係を示す。 D_e は $0.1 \sim 0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度と小さくなる結果となった。また、 D_{Cl} は $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度となり、 D_e に比べて 10 倍程度大きくなった。塩水浸漬前の D_{Cl} は D_e に比べ、大きく算出される傾向があり³⁾、当実験もそれに準ずる結果となっている。 D_{Cl} と D_e の差異の原因としては次のような考察をした。電気泳動試験では直流電流を印加して測定対象物である塩化物イオンを移動させているのに対し、4プローブ法では交流電流を印加して系内の各種イオンを振動させており、拡散や直流電流による電気泳動での塩化物イ

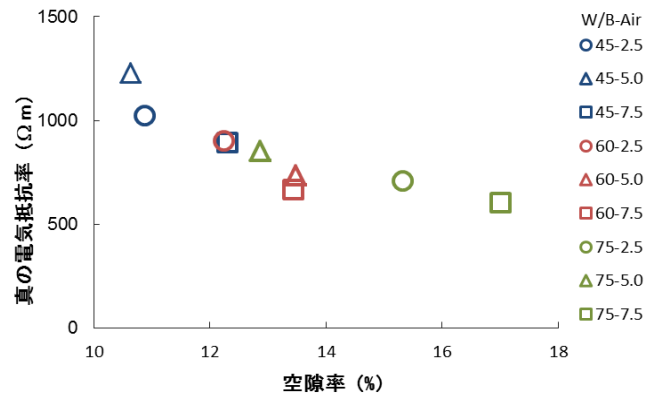


図-2 電気抵抗率と空隙率の関係

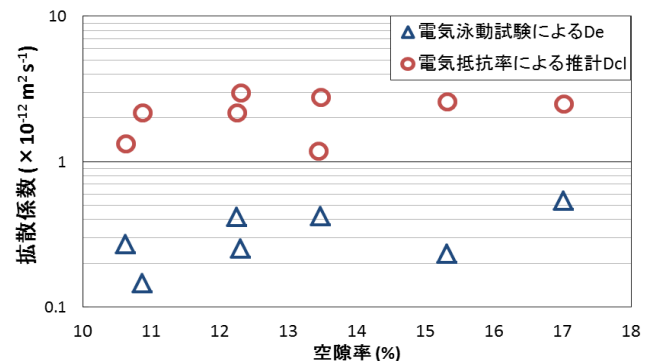


図-3 D_{Cl} と D_e の測定結果

オンの移動経路よりも小さい空隙のイオン移動も評価対象に含まれる可能性が考えられる。そのため、拡散係数が大きく評価されたと推察されるが、この点に関しては今後も明らかにしていく必要がある。

4. まとめ

当実験により LPC-FA 系コンクリートにおいて以下の特性が示された。

- (1) 電気抵抗率は $600 \sim 1200 \Omega \text{m}$ 程度と高い結果となり、AASHTO Designation:TP-11 で判断される塩分浸透性は「Very low」あるいは「Negligible」相当であった。
- (2) 電気泳動試験による実効拡散係数は $0.1 \sim 0.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度の結果となり、推計拡散係数よりも 10 倍程度小さくなった。

《参考文献》

- 1) 庭瀬一仁, 杉橋直行, 枝松良展, 坂井悦郎: 低レベル放射性廃棄物処分施設における異なるフライアッシュを用いたセメント系材料の品質と非破壊試験の適用性に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 1, Jan. 2012
- 2) W. Morris: Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 12, pp. 1779-1787, 1996
- 3) 杉本記載, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真: 塩水に浸漬したコンクリートの電気抵抗率から推計した塩化物イオンの拡散係数に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 831-836, 2016
- 4) 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 齊藤佑貴, 市川聖芳, 井上浩男: コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 119-131, 2010