

論文 フライアッシュを用いた長期材齢コンクリートの塩分浸透抵抗性の評価

川原 真一*1・佐伯 竜彦*2・佐々木 謙二*3・佐藤 道生*4

要旨: フライアッシュを混和したコンクリートの長期材齢における塩分浸透抵抗性を評価するために、最大で5年間養生を行ったフライアッシュコンクリートを用い電気泳動試験を行った。その結果、材齢によらず、フライアッシュを混和することで塩化物イオン実効拡散係数が小さくなり、フライアッシュ置換率が大きいほど、塩化物イオン実効拡散係数が小さくなった。また、フライアッシュの混和による塩分浸透抵抗性向上の要因を検討するため細孔径分布の測定を行った。塩分浸透抵抗性向上の要因のひとつとして、フライアッシュ無混和のものとの細孔構造の違いが考えられた。

キーワード: フライアッシュ, 圧縮強度, 電気泳動試験, 塩化物イオン, 細孔径分布

1. はじめに

フライアッシュを用いたコンクリートは、単位水量の低減、長期にわたる強度増進、耐久性の向上などの効果が期待できる。

塩分浸透抵抗性については、フライアッシュの長期的な水和により細孔構造が緻密化することで塩分浸透抵抗性が向上することが期待されるが、フライアッシュコンクリートの長期材齢における塩分浸透抵抗性は必ずしも十分に把握されていない。

そこで本研究では、最大で5年間養生を行ったフライアッシュコンクリートを用い電気泳動試験を行った。また、フライアッシュの混和による塩分浸透抵抗性の向上の要因として、細孔構造の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは市販の普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³、ブレン値：3260cm²/g）を用いた。細骨材は、石灰石砕砂（表乾密度：2.65g/cm³）および海砂（表乾密度：2.62g/cm³）を混合して用いた。粗骨材は、石灰石砕石（表乾密度：2.70g/cm³）を用いた。フライアッシュは、JIS A 6201のII種に分類されるものを用いた。フライアッシュの物理化学的性質を表-1に示す。

2.2 配合

表-2に、コンクリートの配合を示す。水結合材比は45%、55%、65%の3水準とし、セメントに対するフライアッシュ置換率は0%、18%、28%の3水準とした。

目標スランブおよび目標空気量は、それぞれ12cmおよび4.5%とした。

2.3 実験概要

91日、1年、3年および5年間水中養生を行ったコンクリート供試体を用い、各実験を行った。

(1) 圧縮強度

圧縮強度の測定は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

(2) 塩化物イオン実効拡散係数

塩化物イオン実効拡散係数の測定は、JSCE-G571「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）」に準拠して行った。材齢3年および5年については、フライアッシュを混和した配合のみ試験を行った。

(3) 全細孔量および細孔径分布

全細孔量および細孔径分布は、水銀圧入ポロシメータにより測定を行った。試料は、コンクリートのモルタル部分を5mm角程度に粗砕し、アセトンにより水和停止処理を行った後、シリカゲルを入れたデシケータにおいて恒量となるまで乾燥させたものを用いた。

表-1 フライアッシュの物理化学的性質

	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数(%)		化学成分 (%)				
				材齢 28 日	材齢 91 日	ig loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
FA	2.31	3700	103	82.1	96	2.3	57.3	27.1	7.5	0.9

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 修士2年 (正会員)

*2 新潟大学 工学部建設学科 准教授 博(工) (正会員)

*3 長崎大学 工学部構造工学科 助教 博(工) (正会員)

*4 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 工修 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合	W/B %	FA/B %	s/a %	単位量 (kg/m ³)							
				W	C	FA	S		G	減水剤	AE 剤
							砕砂	海砂			
45-0	45	0	38.5	181	402	0	198	457	1075	1.005	0.0241
45-18		18	36.9	173	315	69	187	431	1126	0.96	0.169
45-28		28	34.6	178	285	111	176	405	1126	0.99	0.1742
55-0	55	0	42.4	173	315	0	230	530	1061	0.788	0.0189
55-18		18	41.1	165	246	54	220	508	1109	0.75	0.102
55-28		28	39.6	168	220	85	214	493	1109	0.763	0.1037
65-0	65	0	44.3	175	269	0	245	565	1045	0.673	0.0135
65-18		18	43.1	166	209	46	236	545	1093	0.638	0.0765
65-28		28	41.5	167	185	72	230	530	1102	0.643	0.0771

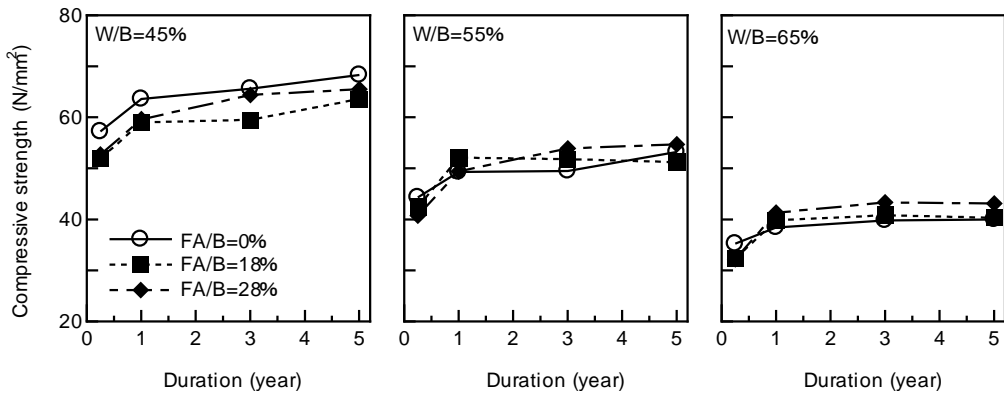


図-1 圧縮強度の経時変化

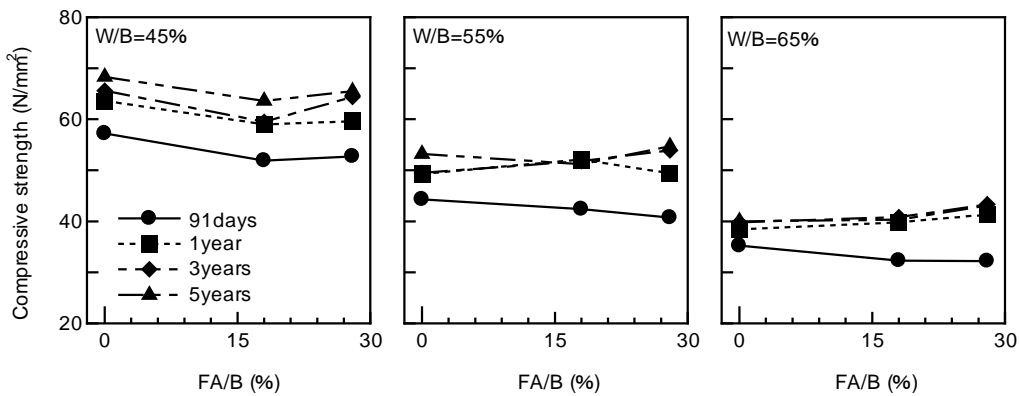


図-2 フライアッシュ置換率と圧縮強度との関係

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1に、圧縮強度の経時変化を示す。水結合材比、フライアッシュ置換率に関わらず材齢91日から1年にかけては圧縮強度の増進が顕著に見られるものの、材齢1年以降は圧縮強度の伸びが緩やかになっていることが分かる。

図-2に、フライアッシュ置換率と圧縮強度との関係を

示す。材齢91日においては、すべての水結合材比でフライアッシュを混和したものの圧縮強度がフライアッシュ無混和のものに比べ若干小さくなった。水結合材比45%においては、材齢1年以降もフライアッシュを混和したものが圧縮強度が小さくなった。水結合材比55%および65%においては、材齢1年以降はフライアッシュ無混和のものよりフライアッシュを混和したものが圧縮強度が若干大きく、フライアッシュ置換率が

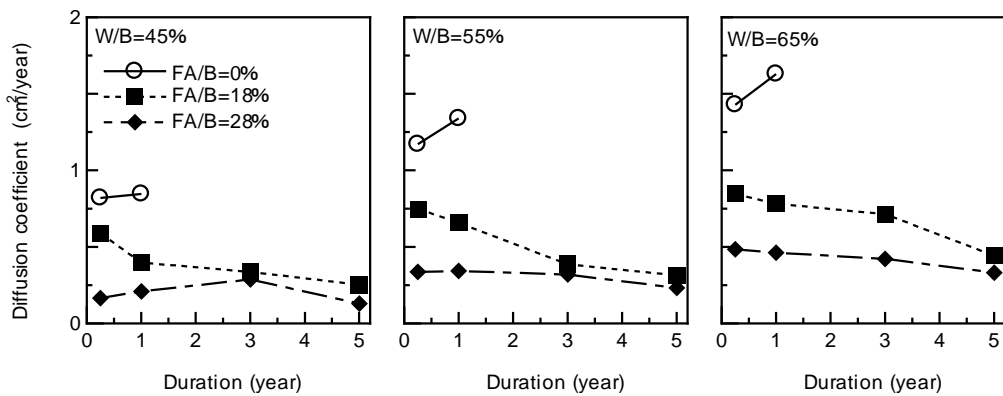


図-3 塩化物イオン実効拡散係数の経時変化

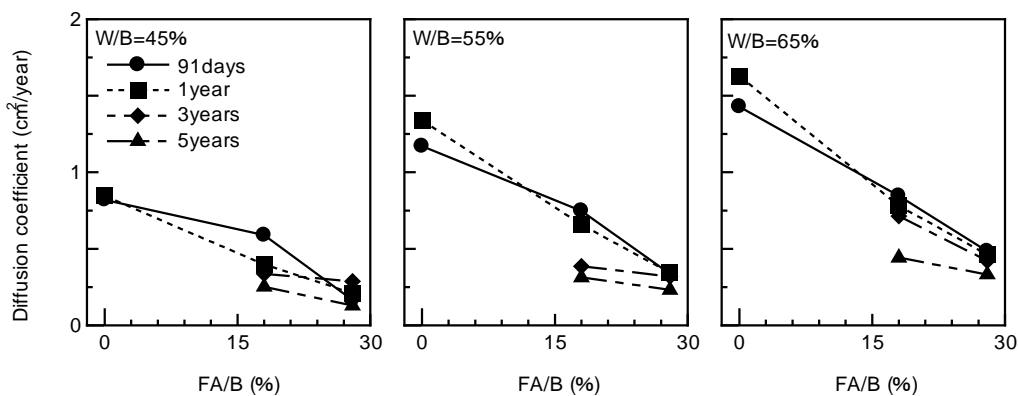


図-4 フライアッシュ置換率と塩化物イオン実効拡散係数との関係

大きいほど圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

材齢 91 日の圧縮強度は、フライアッシュ無混和のものが最も大きかったが、材齢 1 年以降はフライアッシュを混和したものの方が大きくなる傾向を示した。このことから、材齢 91 日から 1 年の間でフライアッシュが活発に反応したものと考えられる。また、フライアッシュ置換率が大きいほど圧縮強度が大きくなる傾向を示したことから、本研究の置換率の範囲では、置換率 18% よりも 28% の方がフライアッシュの反応量が多いものと推定される。

3.2 塩化物イオン実効拡散係数

図-3 に、塩化物イオン実効拡散係数の経時変化を示す。フライアッシュ無混和の配合において、水結合材比 45% の塩化物イオン実効拡散係数は、材齢 91 日から 1 年にかけて大きな変化は見られなかった。水結合材比 55% および 65% においては、塩化物イオン実効拡散係数が若干大きくなる結果となった。一方、フライアッシュを混和した配合の塩化物イオン実効拡散係数は、概ね材齢とともに減少する傾向が見られた。フライアッシュ置換率 18% においては、塩化物イオン実効拡散係数の材齢にともなう変化が大きく、材齢 5 年において置換率 28% と同程度まで低下した。フライアッシュ置換率 28% の塩化物

イオン実効拡散係数の材齢にともなう変化は小さかったが、すべての材齢において置換率 28% の塩化物イオン実効拡散係数が最も小さかった。

図-4 に、フライアッシュ置換率と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。水結合材比、材齢に関わらず、フライアッシュを混和することで塩化物イオン実効拡散係数が大きく低下しており、フライアッシュ置換率の大きいものほど塩化物イオン実効拡散係数が小さくなった。

図-5 に、フライアッシュ置換率とフライアッシュ無混和の塩化物イオン実効拡散係数を 1 としたときの塩化物イオン実効拡散係数の比を示す。なお、材齢 3 年、5 年においては、フライアッシュ無混和の配合の塩化物イオン実効拡散係数の測定を行っていない。セメントは、材齢 1 年において十分に水和が進んでいるものと考えられ、フライアッシュ無混和の配合において、塩化物イオン実効拡散係数は材齢 1 年以降大きく変化しないものと考えられる。そこで、材齢 3 年、5 年については、材齢 1 年のフライアッシュ無混和の配合の実効拡散係数を 1 とすることで拡散係数比を算出した。図より、同一材齢において、フライアッシュ置換率と拡散係数比との関係は水結合材比ごとの違いがほとんど見られないことが分か

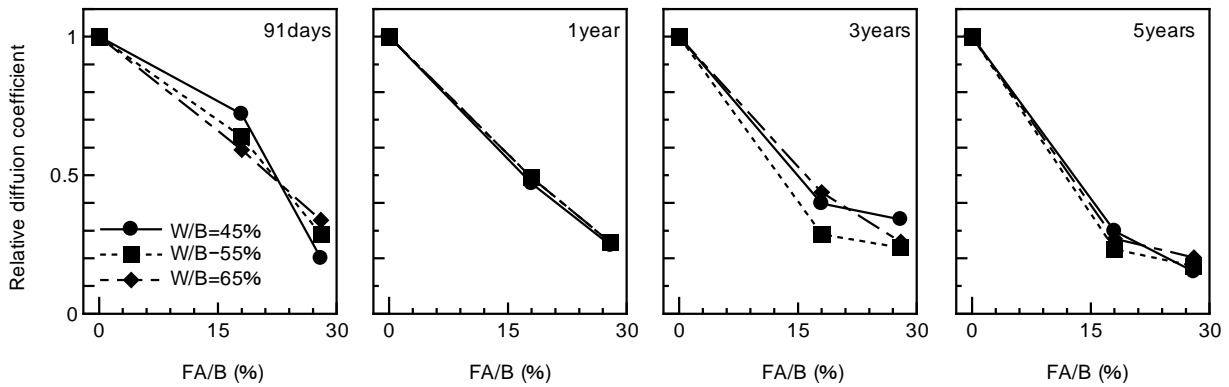


図-5 フライアッシュ置換率と実効拡散係数比との関係

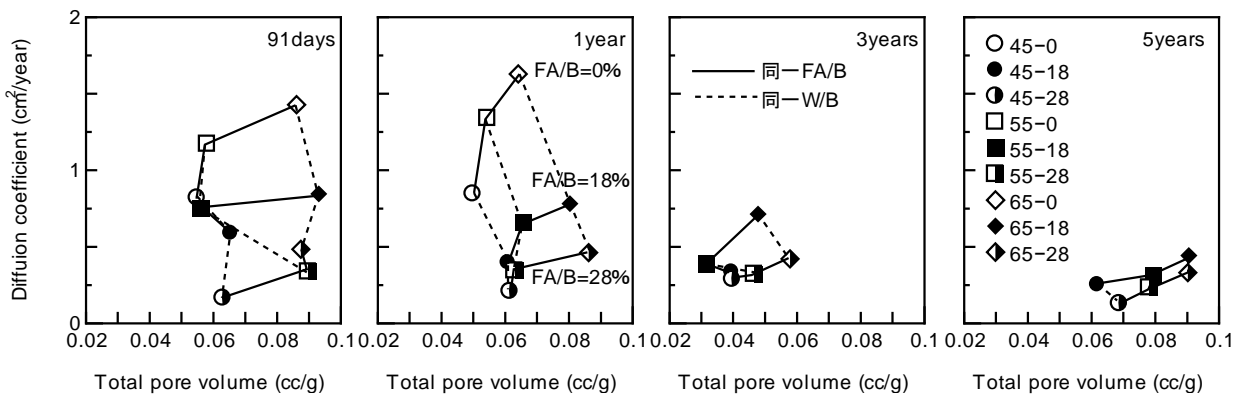


図-6 全細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係

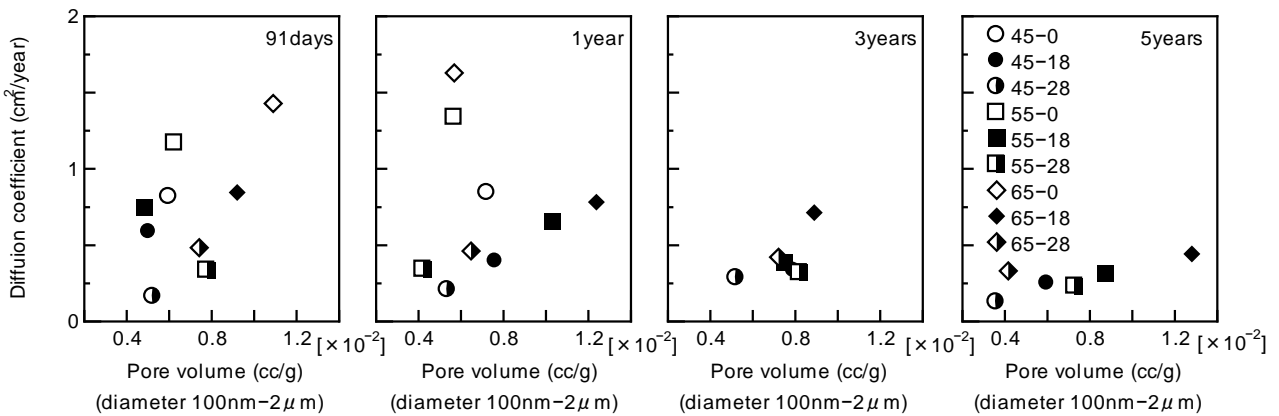


図-7 直径 100nm~2µm の細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係

る。つまり、フライアッシュの混和による塩化物イオン実効拡散係数の低減効果は水結合材比によらず同程度であるといえる。また、フライアッシュ置換率を 0% から 18% に増加させたときの塩化物イオン実効拡散係数の低減率が経時的に大きくなっていることが分かる。材齢 91 日では、フライアッシュ無混和のものに対し 7 割程度であったが、材齢 5 年では 3 割程度まで低下している。一方、フライアッシュ置換率 28% のコンクリートの塩化物イオン実効拡散係数は、材齢 91 日の時点でフライアッシュ無混和のものに対し 3 割程度と既に実効拡散係数

の低減が大きく、経時的にはあまり変化が見られなかった。これは、フライアッシュ置換率 18% に対して置換率 28% では、単位セメント量が小さくなるため水酸化カルシウムの生成量が減少し、ポズラン反応が抑制されたことによるものと考えられるが、今後詳細な検討が必要である。

3.3 フライアッシュの混和が塩化物イオン実効拡散係数に及ぼす影響

フライアッシュを混和した場合の塩化物イオン実効拡散係数低下の要因のひとつとして、細孔構造の緻密化

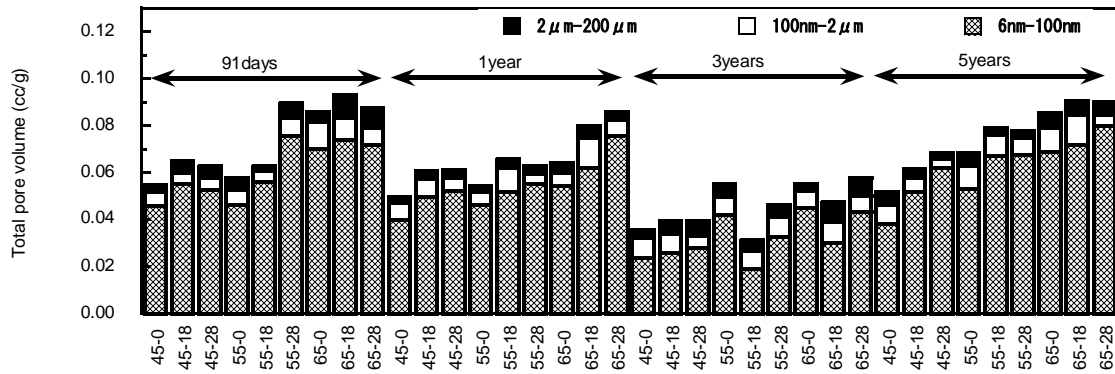


図-8 各配合の区分細孔量

が考えられる。そこで、まず全細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係について検討を行った。

図-6に、全細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。同一フライアッシュ置換率の場合、水結合材比の異なる配合間において両者の間に正の相関が見られ、全細孔量の小さいものほど塩化物イオン実効拡散係数が小さくなる傾向が見られた。しかし、同一水結合材比で比較すると、フライアッシュ無混和のものと混和したものとでは、全細孔量にあまり違いが無いが、フライアッシュを混和したもののほうが全細孔量が若干大きくなっているにも関わらず、フライアッシュ置換率の大きいものほど塩化物イオン実効拡散係数が小さくなった。フライアッシュの混和による塩化物イオン実効拡散係数の低下は全細孔量の減少によるものではなく、他の要因によるものであると考えられる。また、長期的な水和によりフライアッシュを混和した配合の全細孔量は、フライアッシュ無混和のものより小さくなると思われたが、本研究ではそのような傾向は見られず、むしろフライアッシュを混和した配合の方が全細孔量が大きくなる傾向を示した。今後、この原因について検討が必要である。

フライアッシュの混和により、直径100nm~2μmの細孔量の減少が顕著になるとの報告がある¹⁾。そこで、直径100nm~2μmの細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係について検討を行った。図-7に、直径100nm~2μmの細孔量と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。ばらつきはあるものの、水結合材比、フライアッシュ置換率によらず、直径100nm~2μmの細孔量が減少することで塩化物イオン実効拡散係数が小さくなる傾向が見られた。また、長期材齢になるほど両者の関係の傾きが小さくなる。即ち、塩化物イオン実効拡散係数が細孔量に依存しなくなる傾向が見られた。このことから、塩化物イオン実効拡散係数は直径100nm~2μmの細孔量のみならず、他の要因の影響も受けていると考えられる。フライアッシュの混和が塩化物イオン実効拡散係数を低

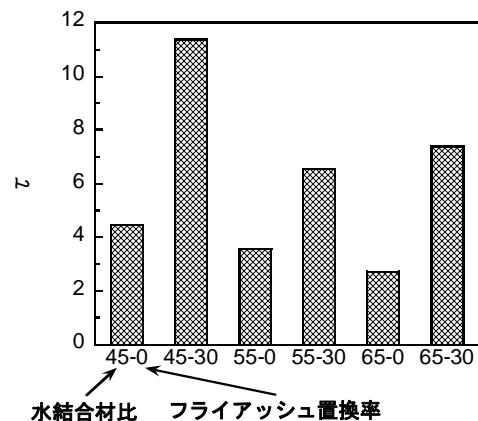


図-9 フライアッシュ混和の有無による屈曲度の違い²⁾

下させるメカニズムを解明するためには、細孔構造の他に細孔壁面における電荷、共存イオン等の影響についても把握する必要があると考えられる。本研究では、細孔構造以外の影響について検討するまでに至らなかったが、細孔構造が塩化物イオン実効拡散係数に影響する要因のひとつであることは、図-7より分かる。そこで、細孔構造に関する更なる検討を行った。

図-8に、各配合の区分細孔量を示す。フライアッシュを混和することで直径100nm~2μmの細孔量が減少するとともに、直径6nm~100nmの細孔量が増加する傾向が見られ、フライアッシュの混和により細孔構造が複雑になっていると考えられる。

本研究で用いたフライアッシュとは異なるが、フライアッシュ(JIS II種)を混和したモルタル供試体を用いて、拡散セル法により塩化物イオン拡散係数を測定し、フライアッシュの混和が細孔構造に及ぼす影響について別途検討した²⁾。モルタル供試体の配合は、水結合材比を45%、55%、65%の3水準とし、セメントに対するフライアッシュ置換率を0%、30%の2水準とした。拡散セル試験により、式(1)を用いて算出した屈曲度を図-9に示す。

$$D_{Cl} = \varepsilon \frac{\delta}{\tau^2} D^* \quad (1)$$

ここに、 D_{Cl} ：塩化物イオン拡散係数 (cm²/s)

D^* ：自己拡散係数 (cm²/s)

ε ：空隙率

τ ：Cl⁻拡散における屈曲度

δ ：収斂度

図より、フライアッシュを混和することで屈曲度が大きくなっており、フライアッシュの混和により細孔構造が複雑になっていることが明らかである。

以上のことから、フライアッシュの混和による塩化物イオン実効拡散係数低下の要因のひとつとして、直径 100nm～2μm の細孔量が減少し、直径 6nm～100nm の細孔量が増加したことで細孔構造が複雑になり、塩化物イオンの移動経路が長くなったことが考えられる。

4. まとめ

本研究では、最大で5年間養生を行ったフライアッシュコンクリートを用い電泳動試験を行った。また、フライアッシュが塩分浸透抵抗性に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 材齢、水結合材比によらず、フライアッシュを混和することで塩化物イオン実効拡散係数が大きく低下した。また、フライアッシュ置換率が大きいほど、塩化物イオン実効拡散係数が小さくなった。
- (2) フライアッシュを混和することで、直径 100nm～2μm の細孔量が減少するとともに、直径 6nm～100nm の細孔量が増加する傾向を示した。
- (3) フライアッシュの混和による塩分浸透抵抗性向上の要因のひとつとして、細孔構造が複雑になったことが考えられる。

参考文献

- 1) 杉山隆文, 清水俊吾, Worapatt RITTHICHAUY, 辻幸和: 電気泳動法を用いたモルタル硬化体の空隙構造の定量化とその考察, 土木学会論文集, Vol.64, No.64, pp227-238, 2004.8
- 2) 菊地道生, 須田裕哉, 佐伯竜彦: 酸素および塩化物イオンの実効拡散係数によるセメント系硬化体におけるイオン移動性状の評価, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp346-353, 2010