

論文 フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの強度および遮塩性（5年間屋外曝露試験結果）

武知 隆男^{*1}・高橋 利昌^{*2}・竹中 佳^{*3}・石井 光裕^{*4}

要旨：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリート（以下「FA 外割コンクリート」）は、ポゾラン反応に伴う細孔構造の緻密化などによるコンクリートの性能向上が期待できるが、実施工規模で性能評価した事例が少ない。このため、実プラントでFA 外割コンクリートを製造後、実施工を想定しポンプ圧送で打設した大型ブロックを、環境条件の厳しい屋外の沿岸部干満帯で5年間ほど曝露し、強度や遮塩性の経年変化に関する試験を行った。その結果、FA 外割コンクリートは、普通コンクリートと同等の28日強度を確保、長期強度の増加および高い遮塩性を有することが確認できた。

キーワード：フライアッシュ, 細骨材補充混和材, 圧縮強度, 塩化物イオン浸透, 屋外曝露

1. はじめに

石炭火力発電所から副産されるフライアッシュ（以下「FA」）をコンクリートに利用する場合、配合の考え方で分類すると、FA をセメント代替材として使用したコンクリート（以下「FA 内割コンクリート」）とFA 外割コンクリートとなり、両者を以下のように定義した。

- ・「FA 内割コンクリート」：セメント代替材として、FA を結合材の内割で使用したコンクリート
- ・「FA 外割コンクリート」：細骨材代替混和材として、FA を結合材の外割で使用したコンクリート

FA をコンクリートに使用すると、長期材齢時の強度の増進、水和熱の減少およびワーカビリティの改善などの効果が得られる反面、FA を内割使用すると初期材齢時の強度が低下するという特性がある。そこで、FA を外割使用すると初期材齢時の強度が確保できるなど、FA を内割使用する場合の特性を補えることが期待できる。

しかし、FA 内割コンクリートと比較し、実施工規模で性能が評価された事例は少ないことから、生コン工場の実プラントで製造したFA 外割コンクリートをポンプ圧送で打設して大型ブロックを作製し、環境条件の厳しい屋外の沿岸部干満帯において5年間ほど屋外曝露して、強度や遮塩性の経年変化に関する試験をこのブロックから採取したコアを用いて行い、FA 外割コンクリートの性能に関する評価を行なった¹⁾。

2. 実験概要

2.1 使用材料

各使用材料の詳細な仕様については、表-1に示す。セメントは、高炉セメントB種および普通ポルトラン

ドセメントを使用した。

細骨材補充混和材として使用するFAは、JIS A 6201に適合するII種およびIV種とし、骨材は阿南市下大野町産の川砂利を破碎した細骨材および粗骨材を使用した。

表-1 使用材料の仕様

材料種別	使用材料	仕 様
セメント (C)	高炉セメントB種(B)	密度:3.04g/cm ³ , フレーン値:3700cm ² /g
	普通ポルトランドセメント(N)	密度:3.15g/cm ³ , フレーン値:3340cm ² /g
細骨材 (S)	玉石砕砂	那賀川(阿南市下大野町産), 密度:2.62g/cm ³ , FM:2.98
粗骨材 (G)	玉砕石	那賀川(阿南市下大野町産), 密度:2.63g/cm ³ , FM:6.85
フライアッシュ (FA)	JIS II種(FA II種)	密度:2.27g/cm ³ , フレーン値:3040cm ² /g, 強熱減量:1.4%, SiO ₂ :50.1%
	JIS IV種(FA IV種)	密度:2.20g/cm ³ , フレーン値:1930cm ² /g, 強熱減量:1.2%, SiO ₂ :50.5%
混和剤	AE剤	[AE1]変性リン酸化合物系陰イオン界面活性剤 [AE2]変性アミノカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体

2.2 配合条件

コンクリートの配合は、セメント種類およびFA種類を各2種類、またFAの細骨材に対する容積置換率4ケースの組合せによる合計7種類を設定し、荷卸し時の条件を以下のとおりとした。

- ・水セメント比：0.55(一定)
- ・FAの細骨材に対する容積置換率：0%, 10%, 20%, 30%
- ・AE減水剤の添加率：C×0.25%(一定)
- ・スランプの範囲：8.0±2.5cm
- ・空気量の範囲：4.5±1.5%

これらの条件で設定したコンクリートの配合ならびに荷卸し時・打設時の性状を表-2に示す。表-2の配合種別については、「FAの種類-容積置換率・セメント種類」と表記し、FAを使用しないプレーン配合については、

*1 四国電力(株) 土木建築部建設資源利用推進グループリーダー (正会員)

*2 四国電力(株) 土木建築部建設資源利用推進グループ副リーダー

*3 四国電力(株) 土木建築部建設資源利用推進グループ (正会員)

*4 (株)四国総合研究所 土木技術部部长 工博 (正会員)

「P-セメント種類」と表記する。

2.3 試験用コンクリートブロックの作製

試験に使用した大型ブロックの寸法は、幅 1.5m×奥行 1.0m×高 0.5m であり、各配合 1 体ずつ、合計 7 体作製した。コンクリートの練混ぜは、生コン工場の実プラントの水平二軸強制練りミキサ（容量 2m³）を使用し、90 秒間の練混ぜを行った。

練混ぜたコンクリートは、現場までの運搬を想定してトラックアジテータ内で 60 分間攪拌し、さらに現場内での運搬を想定して約 50m の配管をポンプ圧送した。コンクリートのポンプ圧送時の状況については、配管の圧力測定を行い、FA を使用することによって圧送時の脈動が抑制され、管内閉塞の危険性が少なく安定した圧送が可能であることを確認した²⁾。またコンクリートの打込みは 3 層に分け、各層内部振動機による締固めを行った。コンクリートの打設状況を、図-1 に示す。

打込み後は、表面のコテ仕上げを行った後、養生シートに散水し、湿布養生を行った。

試験用ブロックは材齢 7 日に型枠を取り外し、材齢 1 ヶ月まで内陸部で屋外曝露した後、沿岸部干満帯（JCI 規準集³⁾の曝露試験場環境区分（以下「JCI 区分」）：A）へ移設し、5 年 3 ヶ月間曝露した（コンクリート材齢として 5 年 4 ヶ月）。曝露時には、打込み面の試験結果への影響を避けるため試験用ブロックを横倒しにし、打込み面を側面とした。試験用ブロックの曝露状況を写真-1 に示す。

沿岸部干満帯の環境は、近傍の気象観測所における曝露期間の観測データによると、気温が平均 16.9℃（最高気温 36.9℃，最低気温-3.6℃），年間降水量は 1,565mm である。

2.4 試験項目および方法

コンクリート試験は、試験用ブロックから採取したコア（φ100mm×L500mm）を用いて、圧縮強度および塩化物イオン浸透に関する試験を実施した。

コンクリートコアの採取位置ならびに試験内容については図-2 に示す。

ここで、試験用ブロックを屋外の沿岸部干満帯に曝露していることから、海面の干満による乾湿や降雨の影響を受けやすい上面と、受けにくい下面では結果が異なる

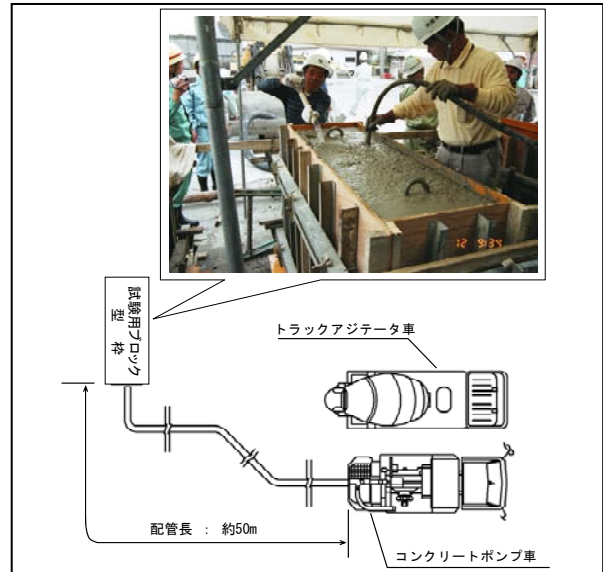


図-1 コンクリートの打設状況



写真-1 試験用大型ブロックの曝露状況
(沿岸部干満帯 上:干潮時,下:満潮時)

と考え、上面と下面のそれぞれのコアを用いて塩化物イオン濃度測定を行った。

なお塩化物イオン濃度は、採取したコアにより、表面から 10mm 刻みでスライス片を採取し、そのスライス片を粉砕した試料を用いてチオシアン酸水銀(II)吸光度法(JIS A 1154)で全塩化物イオン濃度を測定した。

圧縮強度試験(JIS A 1108)については、採取したコンクリートコアの中央部で行った。

表-2 コンクリートの配合条件ならびに荷卸し時・打設時の性状

配合種別	C 種別	FA 種類	FA容積置換率 (Vo1.%)	W/C	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (C×%)	スラブ [*] (cm)		空気量(%)			
						W	C	FA	S	G		荷卸時 (8.0±2.5)	打設時	荷卸時 (4.5±1.5)	打設時		
																AE1	AE2
P-B	BB	-	0	0.55	45	147	268	-	849	1041	0.25	8	-	8.3	7.6	5.9	5.7
IV-10B		10	42		147	268	66	713	1099	47	-	7.6	7.0	4.7	4.7		
IV-20B		20	37		158	288	114	545	1162	-	86	7.5	10.0	4.8	5.4		
IV-30B		30	32		169	308	145	401	1226	-	231	8.6	11.1	5.5	6.3		
II-20B		II種	20		37	155	282	118	550	1170	-	85	10.0	14.0	5.8	6.0	
P-N	N	-	0	0.55	45	147	268	-	852	1047	0.25	4	-	8.3	7.8	4.9	4.4
IV-20N		IV種	20		37	161	293	114	542	1162	-	70	8.7	8.8	4.5	4.5	

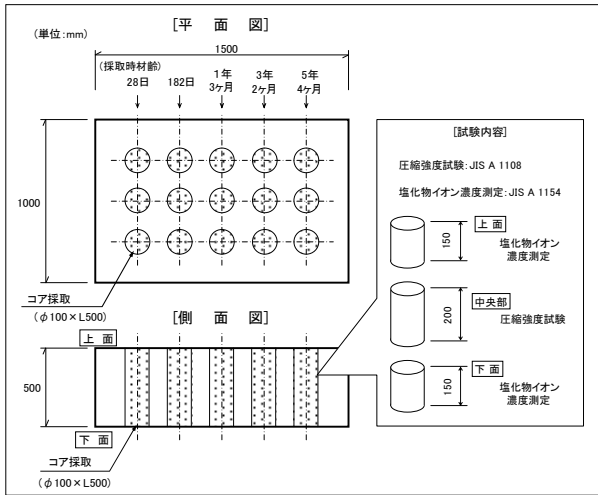


図-2 コンクリートコアの採取位置と試験内容

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度発現への影響

材齢28日および5年4ヶ月の圧縮強度を図-3に示す。材齢28日圧縮強度は、いずれの配合も 30N/mm^2 前後のほぼ同等の圧縮強度であった。これは、W/C、スランプ量、空気量を一定のうえ、FAを外割使用することによって、単位セメント量があまり変化していないためと考えられる。

また、材齢5年4ヶ月の強度増進は、材齢28日に比べてプレーン配合で1.1~1.2倍であるのに比べ、FA外割コンクリートの配合では、1.2~1.4倍と大きかった。これはFAのポズラン反応の進展によるものと考えられる。

P-BとIV-10Bの圧縮強度の経時変化を、一例として図-4に示す。

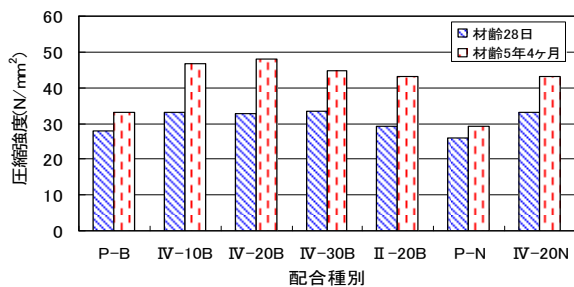


図-3 圧縮強度試験結果

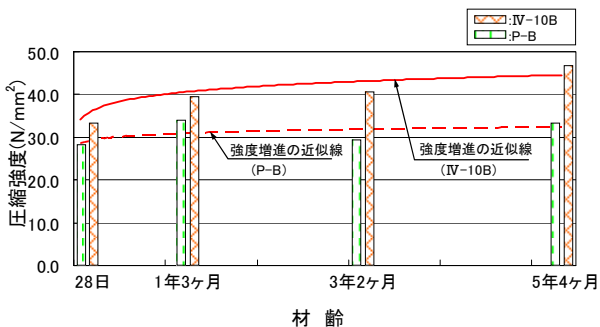


図-4 圧縮強度の経年変化

3.2 塩化物イオンの浸透への影響

(1) 塩化物イオン濃度分布

沿岸部干満帯で曝露した、コンクリートの材齢5年4ヶ月における塩化物イオン濃度測定結果を図-5に、また、下面の塩化物イオン濃度の経年変化を図-6に示す。図-5、図-6から次のことが確認できる。

- ・ コンクリートの表面付近では、上面より下面のほうが塩化物イオン濃度が高くなっている。

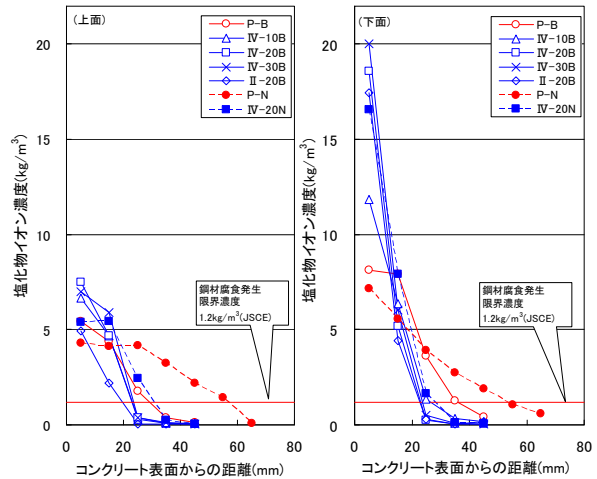


図-5 塩化物イオン濃度測定結果(材齢5年4ヶ月)

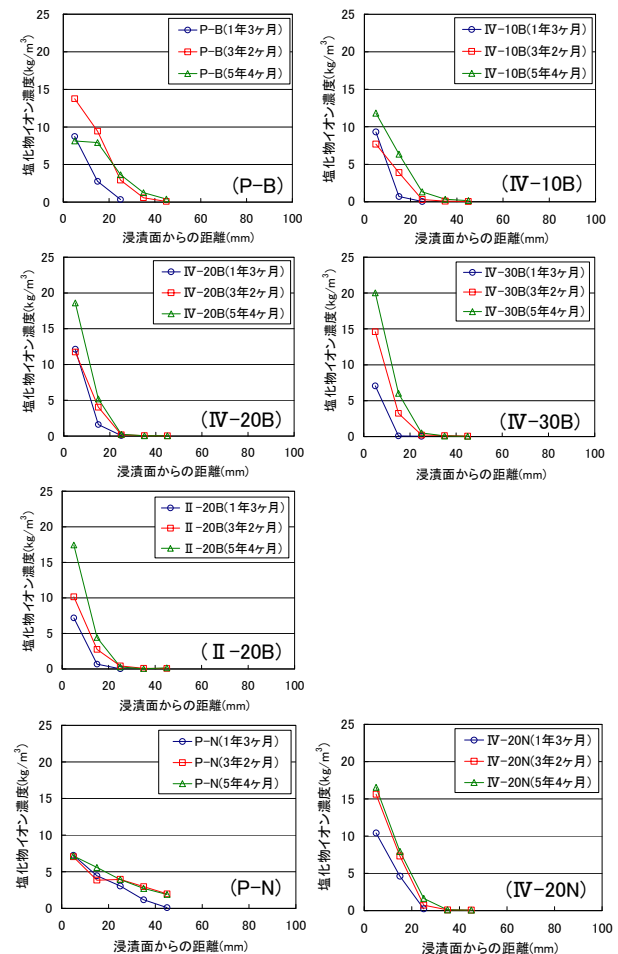


図-6 塩化物イオン濃度の経年変化(下面)

- ・ プレーン配合の塩化物イオン濃度は、上・下面とも30mm以深で鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m^3 (土木学会) を超える濃度を示すのに対し、FA 外割コンクリートは、30mm以深になると、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 以下に低下している。
- ・ FA 外割コンクリートの配合は、プレーン配合と比較し、各材齢ともコンクリート内部の塩化物イオン濃度が低い反面、コンクリート表面付近における塩化物イオン濃度が高い傾向にある。

上面より下面の塩化物イオン濃度が高くなったのは、沿岸部干満帯に曝露したため、下面は海水に浸潤している時間が長いことに対し、上面は海水に浸潤している時間が短く、さらに降雨の影響により上面の塩化物イオンが洗い流されているためと考えられる。

また、プレーンとFA 外割コンクリートの配合の違いに伴う塩化物イオン浸透濃度の差については、FA 使用による塩化物イオンの吸着、固定化やコンクリート組織の緻密化などによって、塩化物イオンの浸透が抑制され、表面付近で蓄積したことが要因と考えられる。

(2)見かけの拡散係数

各材齢の塩化物イオン濃度分布データより、土木学会制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]⁴⁾ で示されている方法で、見かけの拡散係数を算出した。

算出した材齢ごとの見かけの拡散係数を表-3 および図-7に示す。

表-3 および図-7 から次のことが確認できる。

- ・ 見かけの拡散係数は、いずれの配合も材齢とともに減少傾向を示している。これは、普通コンクリートの見かけの拡散係数の経年変化を研究した竹田ほか(1998)⁵⁾の傾向とも整合している。
- ・ P-N の見かけの拡散係数は高い値を示しており、FA 外割コンクリートと P-B は、P-N と比較して低い値を示していることがわかる。

表-3 見かけの拡散係数(下面)

配合種別	材齢	F/A 種類	W/C	W/(C+FA)	拡散係数D ($\text{cm}^2/\text{年}$)
P-B	1年3ヶ月	-	-	-	0.568
	3年2ヶ月				0.363
	5年4ヶ月				0.359
IV-10B	1年3ヶ月	IV種	0.44	0.55	0.206
	3年2ヶ月				0.147
	5年4ヶ月				0.158
IV-20B	1年3ヶ月	IV種	0.39	0.55	0.281
	3年2ヶ月				0.118
	5年4ヶ月				0.071
IV-30B	1年3ヶ月	IV種	0.37	0.55	0.111
	3年2ヶ月				0.141
	5年4ヶ月				0.090
II-20B	1年3ヶ月	II種	0.39	0.55	0.232
	3年2ヶ月				0.216
	5年4ヶ月				0.106
P-N	1年3ヶ月	-	-	-	2.302
	3年2ヶ月				2.318
	5年4ヶ月				1.266
IV-20N	1年3ヶ月	IV種	0.40	0.55	0.765
	3年2ヶ月				0.165
	5年4ヶ月				0.150

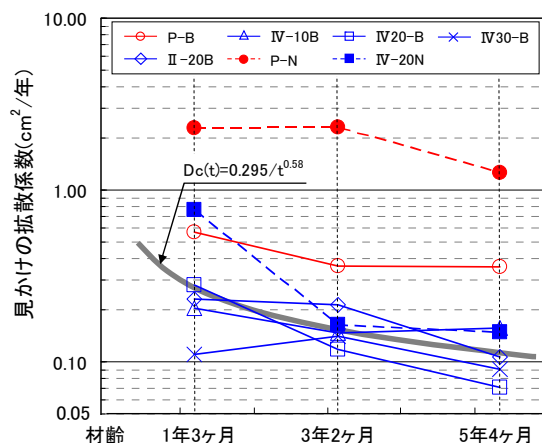


図-7 見かけの拡散係数の経年変化(下面)

- ・ 普通ポルトランドセメントを使用したFA 外割コンクリートは、材齢1年目がP-Bよりも高い値を示しているものの、同じセメントを使用したP-Nと比較すると低い値を示している。
- ・ 高炉セメントを使用したFA 外割コンクリートの配合については、いずれの材齢でもP-Bと比較して、低い値を示している。

これらの結果から、FA 外割コンクリートの配合は、P-Nと比較し、高い遮塩性即ち塩化物イオン浸透抑制性能を有しており、P-Bと比較しても同等以上の塩化物イオン浸透抑制性能を有しているものと考えられる。

(3)見かけの拡散係数の経年変化

FA 外割コンクリートの見かけの拡散係数の経年変化について回帰した結果、

$$Dc(t) = 0.295/t^{0.58} \quad (1)$$

$$Dc(t) : t \text{ 年後の見かけの拡散係数 } (\text{cm}^2/\text{年})$$

$$t : \text{材齢(年)}$$

となる。回帰式を図-7に示す。

一方、竹田ほか(1998)では、

$$Dc(t) = 5.96/t^{0.54} \text{ (曝露環境: JCI 区分 A)} \quad (2)$$

と示されており、経年による減少傾向を示す係数(式(1)の0.58と式(2)の0.54)を比較すると、FA 外割コンクリートの経年変化を示す式(1)の係数のほうが大きいことから、FA 外割コンクリートは普通コンクリートと同等以上の減少傾向を示すものと考えられる。

4. 塩化物イオン浸透抑制性能に関する考察

4.1 FA 外割コンクリートと既往文献との比較

前項で算出した見かけの拡散係数と以下の既往文献との比較を行い、FA 外割コンクリートとFA 内割コンクリート(以下、FA 外割コンクリートとFA 内割コンクリートを総称する場合、「FA コンクリート」)の塩化物イオン浸透抑制性能に関する考察を行った。

- ・ コンクリート標準示方書で示されている見かけの拡散係数の予測式^{6),7)}(以下「示方書予測式」)

- ・ 既往文献^{(8), (9), (10), (11), (12), (13)}の研究で算出されている FA コンクリートの見かけの拡散係数

既往文献における FA コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数を表-4 に示し、表-3 および表-4 の見かけの拡散係数と示方書予測式の関係を図-8 および図-9 に示す。

なお FA コンクリートは、FA 種類について区分せず、本試験により得られた FA 外割コンクリートの見かけの拡散係数と既往文献の FA 内割コンクリートの見かけの拡散係数とを個別に整理し、各々の水結合材比に対する回帰式も算出した。

図-8 から、次のことが確認できる。

- ・ FA 外割コンクリートの見かけの拡散係数は、材齢とともに概ね減少している。
- ・ FA 外割コンクリートの見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメント（以下「OPC」）および高炉セメント B 種（以下「BB」）を使用した場合のコンクリートの示方書予測式（以下「OPC 予測式」および「BB 予測式」）と比較すると、同等かそれ以下になっている。
- ・ FA 外割コンクリートの材齢 1 年 3 ヶ月および材齢 3 年 2 ヶ月の回帰式は、相関係数(R)が小さく、水結合

表-4 既往文献での見かけの拡散係数

文 献	材 齢	FA 種類	FAの配合用途	W/C	W/(C+FA)	拡散係数 (cm ² /年)
杉山ほか (2008) ⁽⁶⁾	6年6ヶ月	II種	内割	0.53	0.450	0.148
				0.64	0.450	0.156
				0.64	0.550	0.233
				0.79	0.550	0.437
	6年9ヶ月	III種	外割	0.70	0.563	0.492
		0.59		0.467	0.120	
笹谷ほか (1997) ⁽⁷⁾	7年	II種	内割	—	0.550	0.650 0.460
酒井ほか(2008) ⁽⁸⁾	10年	—	—	0.50	0.351	0.060 0.322
佐々木ほか (2006) ⁽⁹⁾	15年	I種	内割	0.86	0.600	0.397 0.077
				0.71	0.500	0.530
佐藤ほか (2002) ⁽¹⁰⁾	10年	FAセメント B種	内割	—	—	0.631 0.566 0.114
	20年			—	—	0.620 1.126
	—			—	0.534 0.177	
太田ほか(1991) ⁽¹¹⁾	20年	—	—	—	—	0.407 0.129

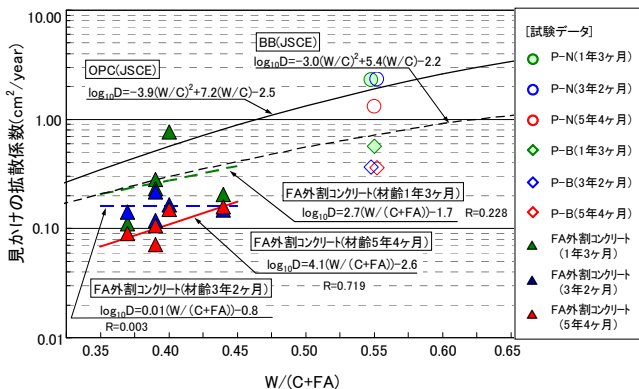


図-8 見かけの拡散係数と水結合材比の関係 (試験データ)

材比との関連性が低い、材齢 5 年 4 ヶ月になると回帰式の相関係数が大きく、水結合材比との関連性が高い。

- ・ FA 外割コンクリートの見かけの拡散係数は、長期材齢(材齢 5 年 4 ヶ月)になると、BB 予測式よりも明らかに小さい。

また、図-9 から、次のことが確認できる。

- ・ FA 内割コンクリートの見かけの拡散係数も、概ね BB 予測式と同等か小さくなっている。
- ・ FA 外割コンクリート(材齢 5 年 4 ヶ月)と FA 内割コンクリート(既往文献データ)の回帰式は、ほぼ同様の傾向を示している。

ここで、FA コンクリートの見かけの拡散係数が OPC および BB 予測式と比較して、概ね小さくなったのは、FA の使用によるポズラン反応の進展に伴って組織が緻密化し、ポズラン反応生成物に取り込まれる塩化物イオンや、細孔壁に吸着、固定化される塩化物イオンが増加することによって、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透が抑制されたことが要因と考えられる。

4.2 FA コンクリートの塩化物イオン浸透抑制性能に関する考察

竹田ほか(1998)の研究から、曝露後 3 年を越えると見かけの拡散係数の変化は比較的緩慢になるとされており、表-4 は見かけの拡散係数が安定した長期材齢(材齢 6 年 6 ヶ月以上)のデータとなっていることから、本試験で得られた表-3 の見かけの拡散係数についても、長期材齢(材齢 5 年以上)のデータを用いて、併せて考察を行うこととした。

表-3 のデータ(材齢 5 年 4 ヶ月の 5 個)と、表-4 の FA コンクリートの全データ(材齢 6 年 6 ヶ月以上の 17 個)を統合して、見かけの拡散係数と水結合材比との関係について算定した回帰式を図-10 に示す。

また併せて、信頼確率 85%(1.0σ [標準偏差])ならびに信頼確率 95%(1.65σ [標準偏差])の回帰式も示した。

図-10 から、次のことが確認できる。

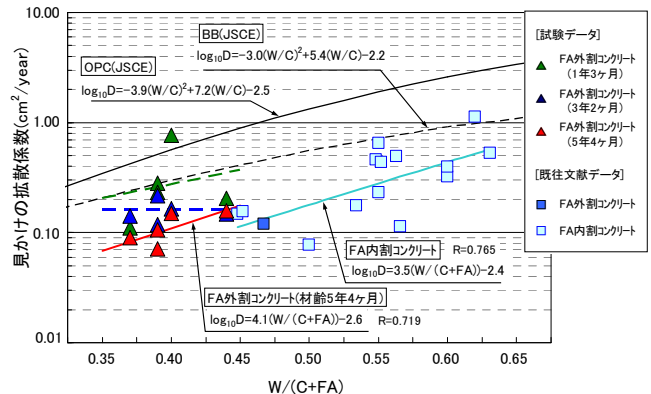


図-9 見かけの拡散係数と水結合材比の関係 (試験および既往文献のデータ)

- FA コンクリートの見かけの拡散係数の回帰式および信頼確率 85%(1.0σ)の回帰式については、OPC および BB 予測式よりも小さくなっている。
- FA コンクリートの見かけの拡散係数の信頼確率 95%(1.65σ)の回帰式については、OPC 予測式より小さく、BB 予測式とほぼ同等となっている。

以上のことから、FA コンクリートの見かけの拡散係数は FA の外割使用や内割使用に関係なく、FA を使用することによる塩化物イオンの吸着、固定化やコンクリート組織の緻密化などが時間経過とともに進展し、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透が抑制されていると考えられる。

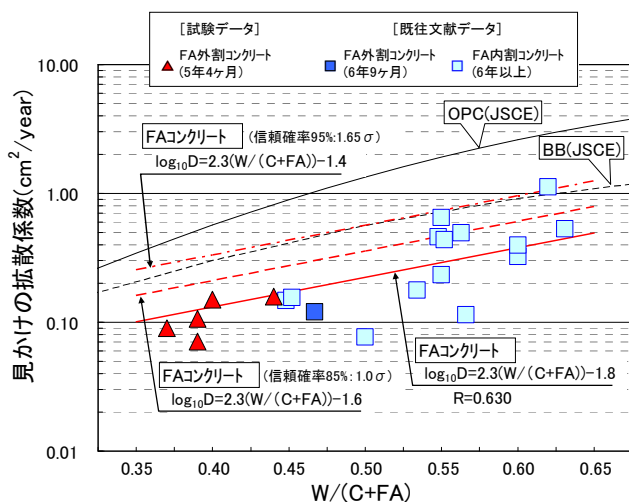


図-10 FA コンクリートの見かけの拡散係数と水結合材比の関係

5. まとめ

沿岸部干満帯で5年間ほど曝露したFA外割コンクリートの強度および塩化物イオンの浸透抑制性能に関する試験の結果、細骨材使用量の低減効果に加え、

- 普通コンクリートと同等の初期材齢強度を発現のうえ、長期強度増進が期待できる
- OPCやBBを使用したコンクリートに比べ、高い塩化物イオンの浸透抑制性能を有している

ことが確認できた。

また、FA外割コンクリートとFA内割コンクリートを併せた長期材齢(材齢5年以上)のFAコンクリートについても、OPCやBBを使用したコンクリートに比べ、高い塩化物イオンの浸透抑制性能を有していることが確認できた。

以上の結果より、FAコンクリートは、沿岸部RC構造物への利用など、コンクリート構造物の延命化やライフサイクルコスト低減への活用が期待できる。

なお今後、FAコンクリートの塩化物イオンの浸透抑制メカニズム解明に向け様々な研究を行うとともに、施工事例を追跡調査するなどデータの拡充をはかり、信頼性

を高めていきたいと考えている。

本試験は土木学会四国支部「四国における石炭灰のコンクリートへの適用性に関する調査研究委員会」(委員長:河野清徳島大学名誉教授)の活動の一環として実施した試験を、委員会終了後も継続実施したものである。

最後に、本稿執筆にあたり、データを提供していただいた杉山隆文北海道大学教授をはじめ、ご助言を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 加地貴ほか:フライアッシュを細骨材補充混和材として使用したコンクリートの3年間曝露試験による強度および耐久性, 電力土木, No.327, pp.78-82, 2007
- 加地貴ほか:フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工性および硬化コンクリート性状, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第58回, pp.V-151, 2001
- (社)日本コンクリート工学協会: J C I 規準集, pp.143-144, 2004
- (社)土木学会:2007 制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.111-112, 2007
- 竹田宣典ほか:種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599, pp.91-104, 1998
- (社)土木学会:2007 制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.113, 2007
- (社)土木学会:コンクリートライブラリー108, 2002年版コンクリート標準示方書[改訂資料], pp.83-88, 2002
- 杉山隆文ほか:フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察, コンクリート工学年次学術論文集, Vol.30, No.1, pp.849-854, 2008
- 笹谷輝彦ほか:海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.571, V-36, pp.91-104, 1997
- 酒井隆行ほか:高流動コンクリートにより構築された海洋構造物の長期物性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, pp.V-314, 2008
- 佐々木勝教ほか:苛酷塩害環境下に長期間曝露したフライアッシュ使用コンクリートの特性, 電力土木, No.321, pp.82-86, 2006
- 佐藤道生ほか:フライアッシュを用いた既設コンクリート構造物の遮塩性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.57, pp.V-746, 2002
- 太田利隆ほか:海岸に曝露したコンクリートへの塩分浸透について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.589-594, 1991