

# 論文 コンクリート中のセシウム浸透挙動とその評価

北野 勇一<sup>\*1</sup>・金田 由久<sup>\*2</sup>・矢島 典明<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリート中のセシウム浸透挙動を把握するため、塩化セシウム-塩化ナトリウム混合水溶液中に浸せきしたコンクリート供試体を用い EPMA 法による測定を行い、塩化物イオンとセシウムの両方の浸透性を検討した。その結果、セシウムは塩化物イオンに比べてコンクリート中への浸透が小さいこと、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートは塩化物イオンの浸透を抑制するばかりでなくセシウムについても同様の効果が得られることを確認した。また、コンクリート中におけるセシウム浸透挙動を定量化するための検討を行い、フライアッシュコンクリートを用いる場合の低拡散性などを評価した。

**キーワード:** セシウム, EPMA 法, 混和材, フライアッシュコンクリート

## 1. はじめに

コンクリート中の物質移行に関する既往の研究は、塩化物イオンや二酸化炭素に関するものが多く、セシウムの浸透挙動については十分に解明されていない。

例えば、横関ら<sup>1)</sup>は温度、相対湿度、配合条件および水和反応を考慮した各種イオンの拡散係数推定モデルを構築し、既往の実験データと対比した結果、セシウムイオンの拡散係数の予測値は実験結果に対して数倍程度大きな値を示したことから、セシウムなどの吸着性のあるイオンについては吸着性を考慮した拡散係数を用いる必要があると指摘している。一方、セメント系材料へのセシウムの吸着特性は、分配係数として 0~3700mL/g の範囲にあり、塩素の分配係数の範囲が 0.8~38mL/g であるのに対し、広く分布する<sup>2)</sup>。これはセシウムがセメント水和物や骨材に吸着(収着)されるためとされ、コンクリートの配合によってはセシウムの分配係数に変化し、コンクリート中のセシウム浸透挙動に大きく影響することが予想される。

また、塩化物イオンの浸透を抑制する方策としては、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材をコンクリートに利用することが有効である。セシウムについても、コンクリート中を主にセシウムイオンとして浸透していくのであれば、塩化物イオンの場合と同様の効果が期待できると予想される。

さらに、塩化物イオンの浸透挙動に関する研究ではあるが、高橋ら<sup>3)</sup>はフライアッシュコンクリート構造物の調査結果から、拡散則では説明できない塩分浸透抑制現象が存在し、そのメカニズムとして、液状水の浸潤限界に伴った塩分浸透の停滞が生じている可能性があるとして指摘している。この仮説が正しければ、セシウムについてもフライアッシュコンクリートを用いる場合には同様の

現象が生じることが予想される。

これらの不明な点を明らかにするために、混和材の有無および種類を変えたコンクリート供試体を作製し、塩化セシウム-塩化ナトリウム混合水溶液中に浸せきした後 EPMA 法による測定を行い、塩化物イオンとセシウムの両方の浸透性について実験的に検討する。対象構造物としては、プレキャスト製のプレストレストコンクリート(以下、PC)部材を活用したコンクリート製地下構造物<sup>4)</sup>とし、この構造物を構成する PC と鉄筋コンクリート(以下、RC)の両部材に用いるコンクリートについて検討する。検討にあたっては、コンクリート製地下構造物の内部に保管される物体中に存在するセシウムが、雨水や地下水の影響でコンクリート中をセシウムイオンとして浸透し、構造物の外部に向かい一様に移動することを想定する。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

実験に用いるコンクリートの配合を表-1に示す。配合 N30 と配合 NF30 は RC 部材を対象に、設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>を材齢 7 日(プレキャスト部材の出荷時材齢)で確保するよう水結合材比(W/B)を 50%とし、前者は普通ポルトランドセメントのみ、後者はこの結合材に対するフライアッシュの利用率を 20%としたものである。ここで、フライアッシュは初期強度発現への寄与がほとんど期待できないことから<sup>5)</sup>、本実験では通常流通する II 種品ではなく、原粉(IV種相当品)を用い、非結合材として扱う(細骨材との置換とする)ことにする。

また、表-1中の配合 H50, HF50, HS650, HS850 は PC 部材を対象に、設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>を材齢 7 日で確保するよう過去の検討実績<sup>5)および6)</sup>を参考に水結合材

\*1 川田建設(株) 技術部 (正会員)

\*2 (株)太平洋コンサルタント 電力・原子力技術部

\*3 (株)ジェイペック 資源リサイクル事業部

表-1 コンクリート配合

配合名	対象部材	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	混和材利用率 SCMs/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )												
					水 W	結合材 B				非結合材 NB							
						セメント C		混和材 SCMs		細骨材 S		粗骨材 G					
						OPC	HPC	S6	S8	F	S	G					
N30	RC	50.0	47.0	0	165	330	0	0	0	0	849	967					
NF30			44.5	20							66		769				
H50	PC	38.4	44.0	0	162	0	422	0	0	0	765	980					
HF50			40.5	20							84		663				
HS650			35.5	43.5							50		228	228	0	737	964
HS850			41.2	40.6									197	0	197	710	1047

OPC：普通ポルトランドセメント (3.16), HPC：早強ポルトランドセメント (3.13), S6：高炉スラグ微粉末 6000 (2.91), S8：高炉スラグ微粉末 8000 (2.91), F：フライアッシュIV種相当品 (2.19), S：硬質砂岩砕砂 (2.64), G：硬質砂岩砕石 2005 (2.66)。括弧内の数値は密度 (単位：g/cm<sup>3</sup>) であり、骨材の場合には表乾密度を示す。

比を決定し、配合 H50 は早強ポルトランドセメントのみ、配合 HF50 はこの結合材に対するフライアッシュの利用率为 20% (非結合材の扱いとする)、配合 HS650 と HS850 は高炉スラグ微粉末 6000 および高炉スラグ微粉末 8000 の利用率をいずれも 50% (結合材の扱いで、セメントとの置換とする) としたものである。

各配合とも同一の骨材を用い、結合材がセメントのみの場合を「普通コンクリート」、フライアッシュを用いる場合を「フライアッシュコンクリート」と呼ぶ。また、混和剤は、高性能 AE 減水剤と AE 剤を用い、所定のスランプ (配合 N30, H50, HS650, HS850 は 12±2.5cm, 配合 NF30 と配合 HF50 は 15±2.5cm) および空気量 (4.5±1.5%) が得られるように使用量を調整する。

## 2.2 供試体の作製と浸せき

実験に用いる供試体の一覧を表-2 に示す。供試体は直径 100mm, 高さ 200mm の円柱とし、表-1 に示す各コンクリートを打設する。RC 用コンクリートは、材齢 1 日で脱枠し、直ちに 20℃ の水中にて材齢 7 日まで養生する。PC 用コンクリートでは、最高温度 45℃ を 6 時間保持する蒸気養生を行い、材齢 1 日で脱枠する。所定の養生を終えた後、打設した上面側より 5cm の位置で切断し、この切断した面を除き、エポキシ樹脂で被覆する。

作製した供試体は、PC 用コンクリートで材齢 1 日、RC 用コンクリートで材齢 7 日より、温度 20℃, 湿度 60% の室内にて封緘の状態 で材齢 28 日以降まで保管する。保管完了後、急激な吸水を抑制するため、供試体をイオン交換水に 2 日間浸せきする。引き続き、セシウムおよび塩化物イオンの濃度が 3.0 質量% になるように塩化セシウムおよび塩化ナトリウムをイオン交換水に溶解して調整した塩化セシウム-塩化ナトリウム混合水溶液中に表-2 に示す期間まで浸せきする (写真-1 参照、また、この浸せき方法は JSCE-G572-2013 を参考にした)。フライアッシュモルタルを用いたとしても保管 91 日までは

表-2 コンクリート供試体一覧

配合名	養生・保管方法	浸せき期間		シリーズ
		6ヶ月	12ヶ月	
N30	水中7日 後に封緘	N30A	N30B	2
NF30		NF30A	NF30B	
H50	蒸気養生 後に封緘	H50A	H50B	
HF50		HF50A	HF50B	
H50		H50C	H50D	1
HS650		HS650A	HS650B	
HS850		HS850A	HS850B	



写真-1 供試体の浸せき状況

塩分浸透が進行したことから<sup>5)</sup>、浸せき期間は塩分浸透停滞が確認できるように6ヶ月と12ヶ月に定める。なお、供試体の作製と浸せきは、時期をずらして2回行う。

## 2.3 測定

### (1) 塩分浸透深さの測定

浸せきが終了した供試体を割裂し、割裂面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧し、浸透面から変色した部分までの距離をノギスで測定する。測定箇所は 10mm 間隔、読み値は 1mm 単位とし、測定結果の平均を塩分浸透深さとする。

### (2) EPMA 法による測定

上記(1)項の測定を終えた供試体のうち、H50D、

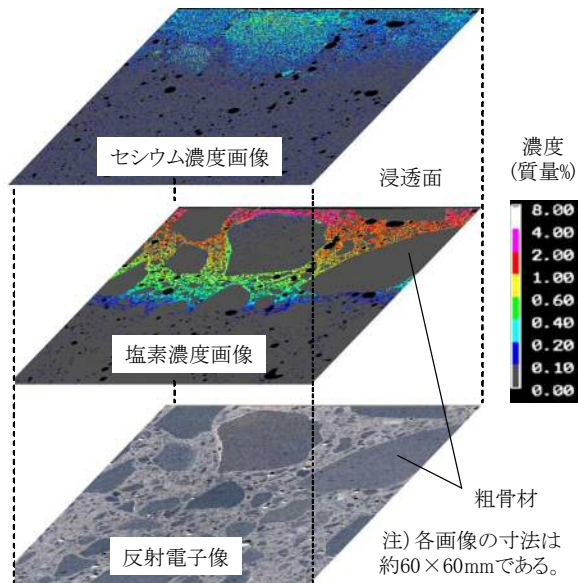


図-1 EPMA 法による測定結果 (N50B 供試体)

HS650BおよびHS850Bを除き、浸透面中央部の幅75mm、浸透面からの距離75mmの大きさの試料を切り出し、JSCE-G574に準拠するEPMA法によりセシウムおよび塩化物イオンの濃度の測定を行う。

### (3) 浸せき溶液の濃度測定

浸せき溶液中のセシウム濃度はICP-MS、塩化物イオン濃度は電位差滴定法を用いて測定する。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コンクリート中のセシウム浸透性状について

EPMA法による測定結果の一例として、N50B供試体のセシウムおよび塩素の濃度画像（元素の質量百分率を指標としたカラーバーに従い表示する。ただし、空隙は非表示とする）と反射電子像を図-1に示す。図より、塩素は骨材を避けるようにコンクリート中に浸透しているのに対し、セシウムは骨材の有無を問わずにコンクリート中を浸透し、かつ、粗骨材のセシウム濃度が周辺より明らかに高くなっている。

図-2は、EPMA法による測定結果をもとに、浸透深さ方向に0.5mm毎にペースト相当部（ $22.5 \text{ 質量}\% \leq \text{CaO} \leq 55.0 \text{ 質量}\%$ および $8.0 \text{ 質量}\% \leq \text{SiO}_2 \leq 30.0 \text{ 質量}\%$ の条件を満たすピクセルとする）の濃度を平均し、普通コンクリート（配合N30）についてセシウムおよび塩化物イオンの濃度分布を作成したものである。ここで、濃度表示は、初期濃度と測定誤差を考慮し、セシウムで0.01質量%、塩化物イオンで0.05質量%未満のプロットを非表示としている。図には浸せき期間が6ヶ月（N30A供試体）と12ヶ月（N30B供試体）の結果を示したが、いずれも、セシウムは塩化物イオンに比べてコンクリート中への浸透が小さくなるのがわかる。また、塩化物イオンは浸

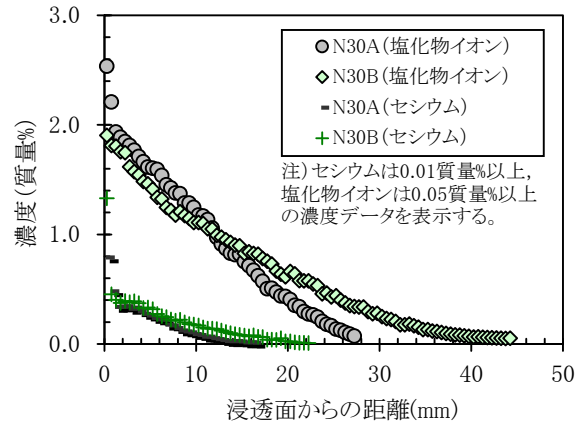


図-2 普通コンクリート（配合 N30）におけるセシウムおよび塩化物イオンの濃度分布

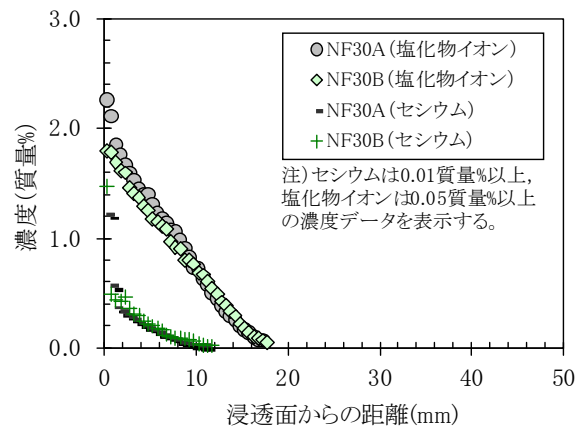


図-3 フライアッシュコンクリート（配合 HF30）におけるセシウムおよび塩化物イオンの濃度分布

透面付近の濃度が概ね2.0質量%以上であるのに対し、セシウム濃度は浸透面からわずか1mmの範囲で0.4質量%前後になっている。この点については、浸せき溶液のセシウムおよび塩化物イオンの濃度を3.0質量%としたことからすると、セシウムは浸透深さだけでなく、表面濃度も大幅に抑制されているといえる。

なお、浸せき溶液中のセシウム濃度の測定結果は3.00質量%、塩化物イオン濃度は3.06質量%であり、概ね設定した濃度であることを確認している。

### 3.2 フライアッシュコンクリートの場合に予想されるセシウム浸透の停滞について

フライアッシュコンクリートにおけるセシウムおよび塩化物イオンの濃度分布を図-3に示す。図より、浸せき期間が6ヶ月の供試体NF30Aと12ヶ月の供試体NF30Bのセシウムおよび塩化物イオンの濃度分布はほとんど変わらないことがわかる。前出図-2の普通コンクリートと対比すると、塩化物イオンのみならず、セシウムについても深さ方向への浸透が停滞している様子が見て取れる。この傾向は、PC用コンクリートも同様であ

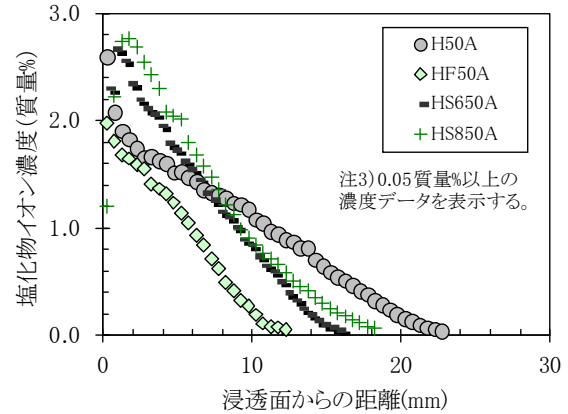
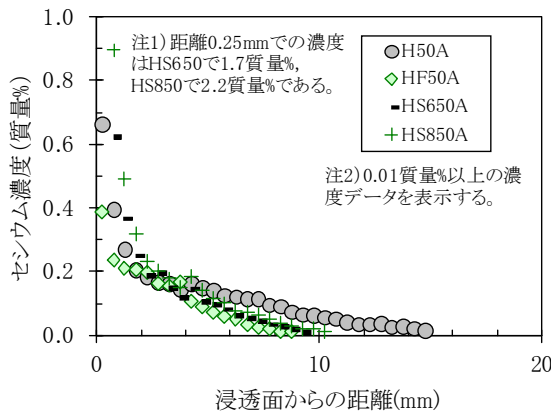


図-4 混和材の利用がセシウムおよび塩化物イオンの浸透挙動に与える影響

ることを確認している。このように、フライアッシュコンクリートの場合に予想されるセシウム浸透の停滞は、実現象として生じることが実験的に明らかにされた。

### 3.3 混和材の利用により予想されるコンクリート中のセシウム浸透の抑制効果について

浸せき期間 6 ヶ月の PC 用コンクリート供試体に着目し、セシウムおよび塩化物イオンの濃度分布を整理した結果を図-4 に示す。図より、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートは、塩化物イオンの浸透を抑制するばかりでなく、セシウムについても浸透が抑制されることがわかる。

次に、セシウムおよび塩化物イオンの濃度分布をフィックの拡散方程式の解で回帰し、セシウムおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めた結果を表-3 に示す。混和材利用によるコンクリート中のセシウム浸透抑制効果は、普通コンクリートの拡散係数との比率で 22~44% となり、塩化物イオンで確認された 31~61% と同様の効果が期待できることが明らかになった。なお、ここに示す拡散係数は、浸せき期間を通じて一定でかつコンクリート中へのセシウムおよび塩化物イオンの固定化や吸着の影響も変化しないと仮定して算出したものであり、外来のセシウムおよび塩化物イオンに加え内在する各種イオンが共存する影響などが含まれたものである。

表-3 EPMA 法による見掛けの拡散係数

供試体	セシウム		塩化物イオン	
	拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	比率	拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	比率
N30A	0.75	---	2.24	---
NF30A	0.20	26%	0.91	41%
N30B	0.54	---	1.15	---
NF30B	0.18	33%	0.71	61%
H50A	0.38	---	1.45	---
HF50A	0.17	44%	0.62	43%
HS650A	0.09	22%	0.59	41%
HS850A	0.16	42%	0.96	66%
H50B	0.45	---	0.92	---
HF50B	0.11	24%	0.29	31%
H50C	0.45	---	1.39	---

※比率は普通コンクリートと混和材を用いたコンクリートとの比率で、強度水準 (RC と PC) や材齢別に対比する。

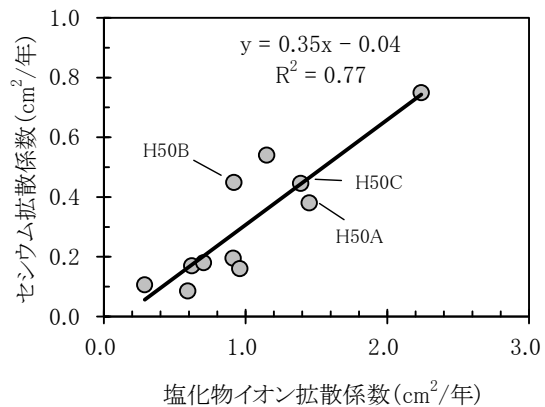


図-5 セシウムおよび塩化物イオン拡散係数の関係

## 4. コンクリート中のセシウム浸透挙動の評価

### 4.1 コンクリート中におけるセシウム分配係数

#### (1) セシウム分配係数の算出手法について

前出の表-3 より、セシウムおよび塩化物イオン拡散係数の関係を整理した結果を図-5 に示す。図からわかるように、今回作製したコンクリート供試体に関しては、塩化物イオン拡散係数とセシウム拡散係数との間に相関性が認められ、その割合は 35% であった。また、水溶液中のイオン拡散係数は Einstein の関係式に基づき電気的なイオン移動度から理論的に算出でき<sup>1)</sup>、25℃の水溶液

中のイオン移動度 ( $D_0$ ) はセシウムイオンで  $650\text{cm}^2/\text{年}$ 、塩化物イオンで  $640\text{cm}^2/\text{年}$  と、両者の差は水溶液中においては小さい。つまり、本実験で得られたセシウムと塩化物イオンのコンクリート中の拡散係数の違いは、コンクリート中におけるセシウムと塩化物イオンの吸着特性 (分配係数) の違いに主に起因すると考えられる。

ところで、セシウムおよび塩化物イオンの分配係数は、式(1)および式(2)より求めることができる。

$$D_{eff}^{Cs} = D_{ap,EPMA}^{Cs} \cdot (1 + K_d^{Cs}) \quad (1)$$

$$D_{eff}^{Cl} = D_{ap,EPMA}^{Cl} \cdot (1 + K_d^{Cl}) \quad (2)$$

ここで、 $D_{eff}^{Cs}$  および  $D_{eff}^{Cl}$  : セシウムおよび塩化物イオンの有効拡散係数、 $D_{ap,EPMA}^{Cs}$  および  $D_{ap,EPMA}^{Cl}$  : EPMA 法によるセシウムおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数、 $K_d^{Cs}$  および  $K_d^{Cl}$  : セシウムおよび塩化物イオンの分配係数(ただし、ここでは収着や固定化の区別をしない)。

この式(1)および式(2)より、セシウムの分配係数  $K_d^{Cs}$  について整理すると、式(3)が得られる。

$$K_d^{Cs} = \frac{1 + K_d^{Cl}}{\beta} \cdot \frac{D_{eff}^{Cs}}{D_{eff}^{Cl}} - 1 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{D_{ap,EPMA}^{Cs}}{D_{ap,EPMA}^{Cl}} \quad (4)$$

ここで、 $\beta$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数に対するセシウムの見掛けの拡散係数との比。

### (2) セシウム分配係数の算出結果

本研究の範囲においては、 $\beta = 0.35$  が得られている。また、既往の知見<sup>1)</sup> から  $K_d^{Cl} = 0.28$ 、セメント系材料などの多孔質体の有効拡散係数  $D_{eff}$  と水溶液中のイオン移動度  $D_0$  は比例関係にあると言われているので  $D_{eff}^{Cs} / D_{eff}^{Cl} = 650/640$  と置き換えることができる。これらの値を式(3)に代入し、セシウムの分配係数を求めると  $K_d^{Cs} = 2.7$  と算出される。これは前出の横関<sup>1)</sup> が求めた  $K_d^{Cs} = 4$  と大きく異なるものではない。

## 4.2 フライアッシュコンクリートのセシウム拡散係数

### (1) セシウム拡散係数の算出手法について

先に述べたように、フライアッシュコンクリートを用いる場合は、拡散則に従わないと考えられるセシウム浸透挙動を示す。このため、EPMA 法の測定結果からセシウム拡散係数を求めると、フライアッシュコンクリートの低拡散性を適切に評価することができない。そこで、セシウム浸透の停滞を考慮したセシウム拡散係数の算出手法について、後藤らの研究<sup>7)</sup> を応用して検討する。

後藤らは、硝酸銀を用いた塩分浸透深さと浸せき時間が式(5)の関係にあることをセメントペースト硬化体にて確認し、この関係に基づき塩化物イオン拡散係数を求める方法(以下、硝酸銀発色法)を提案している。

$$x = 2k \cdot \sqrt{D_{ap,CASS}^{Cl} \cdot t + \alpha} \quad (5)$$

ここで、 $D_{ap,CASS}^{Cl}$  : 硝酸銀発色法による塩化物イオン拡散係数、 $x$  : 塩分浸透深さ、 $k$  : 傾き、 $t$  : 浸せき時間、 $\alpha$  : 切片(ここでは取り扱うことはない)。

この式(5)より普通コンクリートの塩化物イオン拡散

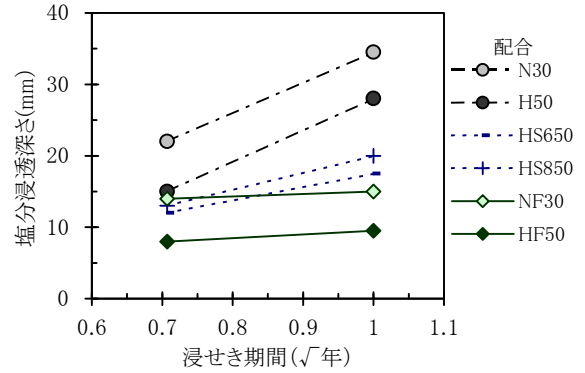


図-6 塩分浸透深さの測定結果

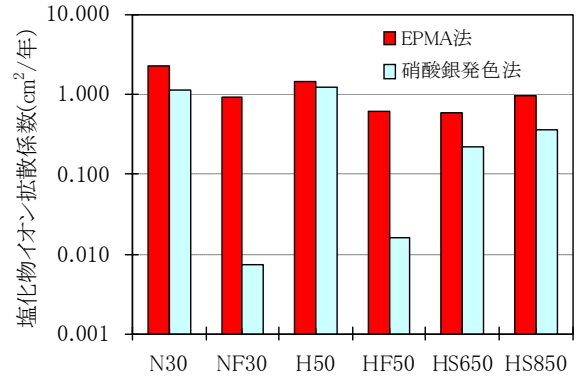


図-7 硝酸銀発色法による塩化物イオン拡散係数

係数  $D_{ap,CASS}^{Cl}$  が正確に算出できるようであれば、硝酸銀発色法によるセシウム拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cs}$  は式(6)を用いて求めることができる。

$$D_{ap,CASS}^{Cs} = \beta \cdot D_{ap,CASS}^{Cl} \quad (6)$$

### (2) 塩化物イオン拡散係数 $D_{ap,CASS}^{Cl}$ の算出結果

本研究において、塩分浸透深さを測定した結果を図-6に示す。この結果より式(5)中の傾き  $k$  を求め、塩化物イオン拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cl}$  を算出した結果を図-7に示す。図には、EPMA 法(浸せき期間は6ヶ月)から求めた塩化物イオン拡散係数  $D_{ap,EPMA}^{Cl}$  を併せて示す。図より、配合 N30 や配合 H50 のように普通コンクリートでは、硝酸銀発色法と EPMA 法の塩化物イオン拡散係数が概ね一致することがわかる。これに対し、フライアッシュコンクリートである配合 NF30 と配合 HF50 では EPMA 法に比べ硝酸銀発色法による塩化物イオン拡散係数が 1/10 以下となっている。

また、図-7 中の高炉スラグ微粉末を用いた配合 HS650 と配合 HS850 については、硝酸銀発色法による塩化物イオン拡散係数が EPMA 法よりも若干小さくなる傾向にあるが、図-6 の結果からすると、フライアッシュコンクリートで確認されたような塩分浸透の停滞はそれほど認められない。この点については、今回の実験結果が、例えば谷口らの研究<sup>8)</sup> において、高炉スラグ微粉

末を用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数は浸せき期間が長いほど小さくなる傾向にあるが浸せき期間 91 日以降では大きくは変化しないという実験結果と整合することから、スラグの潜在水硬性の進行が影響したものと推察される。なお、フライアッシュコンクリートにおける塩分およびセシウムの停滞現象についてはポゾラン反応に起因した影響も含まれる可能性がある。

### (3) セシウム拡散係数 $D_{ap,CASS}^{Cs}$ の算出結果

前出の図-7 に示した塩化物イオン拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cl}$  および本研究で得られている  $\beta=0.35$  より、式(6)を用いてセシウム拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cs}$  を算出した結果を図-8 に示す。図からわかるように、セシウム拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cs}$  についても塩化物イオン拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cl}$  の場合と同様の傾向を示し、とりわけ、配合 NF30 や配合 HF50 のフライアッシュコンクリートでは普通コンクリートに比べセシウム拡散係数  $D_{ap,CASS}^{Cs}$  が 1/100 程度以下まで小さくなることが明らかになった。この結果は、EPMA 法から確認されるセシウム浸透深さを用い、式(5)よりセシウム拡散係数を直接求めた結果と概ね一致することを確認している。

## 5. まとめ

塩化セシウム-塩化ナトリウム混合水溶液中に浸せきしたコンクリート供試体を用い EPMA 法による測定を行い、塩化物イオンとセシウムの両方の浸透性について確認するとともに、コンクリート中におけるセシウム浸透挙動を定量化するための検討を行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) セシウムは塩化物イオンに比べてコンクリート中への浸透が小さくなる。これは、コンクリート中におけるセシウムと塩化物イオンの収着特性の違いに主に起因すると考えられるが、今回の実験においてはセシウムの収着特性に与える混和材の有無や種類あるいは強度水準の影響は小さく、セシウムの分配係数を求めると  $K_d^{Cs}=2.7$  と算出される。
- (2) フライアッシュや高炉スラグ微粉末をコンクリートに用いることにより、コンクリート中のセシウム浸透が抑制される。これらの混和材を利用したコンクリート中のセシウム拡散係数は、EPMA 法の測定結果より求めると、普通コンクリートの拡散係数との比率で 22~44% となり、塩化物イオンで確認された 31~61% と同様の浸透抑制効果が得られる。
- (3) フライアッシュコンクリートを用いる場合は、セシウムの浸透停滞が実現象として生じる。このような場合でも塩化物イオン拡散係数を正確に算出することができる硝酸銀発色法を応用し、浸透停滞後のセシウム拡散係数を求めた結果、フライアッシュコンクリートは普通コンクリートに比べ 1/100 程度以下

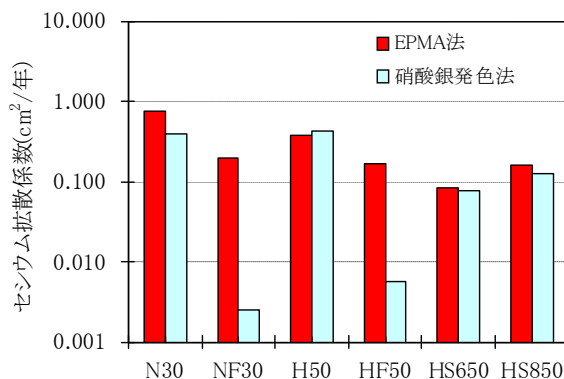


図-8 硝酸銀発色法によるセシウム拡散係数

の低拡散性を有すると評価される。

今後の課題は、骨材へのセシウム収着の定量評価やセシウム拡散係数に与えるコンクリート配合（特に骨材の種類）の影響に着目したデータ蓄積が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 横関康祐, 渡邊賢三, 林 大介, 坂田 昇, 大即信明: 水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル, 土木学会論文集, No.725, pp.131-142, 2003.2
- 2) 核燃料サイクル開発機構東海事業所: セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備 (研究報告), 2002.1
- 3) 高橋佑弥, 岸 利治: フライアッシュコンクリートの塩分浸透抑制現象と液状水浸潤限界の関与, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-177, 2010.9
- 4) 古村 崇, 中山良直, 関東継樹, 山中修一郎: プレキャスト PC 部材組立式地下貯水槽の設計・施工, コンクリート工学, Vol.44, No.4, pp.11-18, 2006.4
- 5) 北野勇一, 塩井健太, 堀池一男, 矢島典明: フライアッシュの品質が PC 用モルタルの性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1 pp.85-90, 2013
- 6) 川口千大, 北野勇一, 堀池一男: プレキャスト PC 部材への高炉スラグ微粉末の適用に関する基礎実験, プレストレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム論文集, pp.351-356, 2012.10
- 7) 後藤誠史, 常谷正己, 柳田洋明, 近藤連一: セメント硬化体中の塩素イオンの拡散, 窯業協会誌, 87 [3], pp.16-23, 1979
- 8) 谷口秀明, 渡辺博志, 手塚正道, 藤田 学: 塩害暴露試験によるコンクリートの塩分浸透性の評価—その 2: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート—, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.1, pp.45-51, 2013.1