

論文 混和材によるセメント硬化体からのセシウム溶出抑制

道正 泰弘*1・村上 一夫*2・陶 宇洲*3・山本 武志*4

要旨： 混和材によるセメント硬化体からのセシウム溶出抑制方法の確立を目的に、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を置換したセメントペースト試料で基本的な効果を確認し、更にモルタル試料でこれらのセメント置換、また、フライアッシュは、セメント置換と砂代替を併用した大量使用による溶出抑制効果について検討を行った。具体的には、水中浸漬試験と細孔径分布測定を実施した。その結果、フライアッシュ II 種、高炉スラグ微粉末は、一定量以上の混入によりセシウム溶出抑制対策として有効であることが判明した。

キーワード： セシウム、セメント、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、溶出、浸漬

1. はじめに

2011年3月11日の福島第一原子力発電所(1F)の事故は、周囲に多量の放射性物質を放出した。その結果、1F構内には多くの放射性物質に汚染されたコンクリート瓦礫(汚染コンクリート塊)が集積されている。汚染源となっている放射性物質のうち、セシウム 137(¹³⁷Cs)の半減期は約 30 年となっている。「福島第一原子力発電所 固体廃棄物の保管管理計画～2019 年度改訂について」¹⁾によると、放射線量が 0.1mSv/h 以下の瓦礫は養生無しの屋外集積となっており、その量は約 30 万 m³に達している。

セシウム(Cs)による汚染コンクリート塊の用途として低品質再生骨材(JIS A 5023, 再生骨材 L 程度)への利用が考えられる。汚染コンクリート塊を原料とした低品質再生骨材を用いたコンクリートを利用する場合、次のような課題が考えられる。①コンクリートから放射線が放出される、②雨、地下水等の影響で Cs が溶出する可能性がある。①は、1F 構内の汚染コンクリート塊の多くは低線量であり、利用先を構内利用に限定し、対策を行うことで解決できると考えられる。一方、②は筆者らの研究(既報²⁾)などにより、Cs を混入したセメントペースト(ペースト)試料について、混和材としてフライアッシュ(FA)や高炉スラグ微粉末(BFS)を一定量用いることで、Cs の溶出抑制の可能性が水中浸漬試験により確認されている。

本研究は、混和材によるセメント硬化体からの Cs 溶出抑制方法の確立を目的に、ペースト試料で基本的な効果を確認し、更にモルタル試験体で FA, BFS のセメント置換、また、FA については、セメント置換と砂代替²⁾を併用した大量使用による溶出抑制効果について検討を行った。なお、ペースト試料においては、既報²⁾の内容に加え、混和材を高置換した水準を加えた検討を行った。分析は、ペースト、モルタル試料ともに水中浸漬試験と細孔径分布測定を実施し、メカニズムについて考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1にセメントおよび混和材の主要品質を示す。普通ポルトランドセメント(N), フライアッシュ II 種(JIS A 6201, FAII-1, FAII-2)および高炉スラグ微粉末 4000(JIS A 6206, BFS-1, BFS-2)を用いた。実験に用いた Cs 源としては非放射性 Cs の化合物である特級試薬の塩化セシウム(CsCl, 比重 3.988)を練混ぜ水に溶解させ、練混ぜの過程で試験体中に均一に分布するように調整した。CsCl の混入率は、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)による Cs の検出が容易かつ溶出抑制効果が明確になることを考慮して、検出限界を十分上回る濃度になるよう溶液調整した練混ぜ水を使用した。なお、練混ぜ水には、純水を用いた(比抵抗値 5MΩ・cm 以上)。

表-1 セメントおよび混和材の主要品質

項目	N	FAII-1	FAII-2	BFS-1	BFS-2
密度 (g/cm ³)	3.16	2.30	2.29	2.91	2.91
ブレーン値 (cm ² /g)	-	3740	3570	-	-
比表面積 (cm ² /g)	3300	-	-	3950	4260
湿分 (%)	-	0.5≧	0.5≧	-	-
MB 吸着量 (mg/g)	-	0.29	0.23	-	-
SiO ₂ (%)	-	59.7	60.1	-	-
MgO (%)	1.49	0.95	1.69	5.75	5.70
Al ₂ O ₃ (%)	-	28.45	22.37	-	-
Fe ₂ O ₃ (%)	-	4.38	6.07	-	-
CaO (%)	-	2.10	4.18	-	-
SO ₃ (%)	2.13	-	-	2.07	2.09
Cl (%)	0.011	-	-	0.004	0.004
強熱減量 (%)	2.29	2.2	1.8	-	0.08
91 日活性度指数(%)	-	-	-	121	116
フロー値比 (%)	-	-	-	103	100
Na ₂ O (%)	0.35	-	1.43	-	0.29
K ₂ O (%)	0.56	-	1.00	-	0.26
Cs (ppm) ^{*1}	(1.0) ^{*2}	(8.6±0.2) ^{*3}		-	

*1:()は参考値。*2:普通ポルトランドセメント 3 試料の平均値を示す。*3 石炭フライアッシュ(JCFA-1)の値³⁾を示す。

*1 名城大学 理工学部環境創造学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 清水建設(株) 原子力・火力本部 理事 工学修士 (正会員)

*3 名城大学大学院 理工学研究科環境創造学専攻 (学生会員)

*4 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所構造工学領域 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

表-2 ペースト試験体の配(調)合概要 (質量比: %)

養生条件, 使用材料	N ^{※2}	FA15 ^{※3}	FA25 ^{※3}	FA30	FA50	FA70	BFS20 ^{※3}	BFS40 ^{※3}	BFS70
養生条件	-	FB 相当	FC 相当		大量使用		BA 相当	BB 相当	BC 相当
	50℃水中								
N	100	85	75	70	50	30	80	60	30
FAII-1	-	15	25	-	-	-	-	-	-
FAII-2	-	-	-	30	50	70	-	-	-
BFS-1	-	-	-	-	-	-	20	40	-
BFS-2	-	-	-	-	-	-	-	-	70
W ^{※1}	30	30	30	30	30	30	30	30	30
CsCl	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

※1: $W(\text{kg/m}^3) = W(\text{kg/m}^3) + W(\text{kg/m}^3) \times 0.3\% (\text{CsCl})$, ※2: 一部既報³⁾にて実施, ※3: 既報³⁾にて実施

表-3 モルタル試験体の配(調)合概要 (質量比: %)

養生条件, 使用材料	NS-1	NS-2	FA30S	FA30FS20	FA30FS40	BFS70S	
	-	-	FC 相当	FC 相当, 砂代替		BC 相当	
養生条件	20℃水中		50℃水中				
水中浸漬試験, 細孔径分布	20℃水中		50℃水中				
養生条件	20℃水中		50℃水中	20℃水中			
結合材種類	N	100	100	70	70	70	30
	FAII-2	-	-	30	30	30	-
	BFS-2	-	-	-	-	-	70
	FAII-2 ^{※2}	-	-	-	11, [(B+FAII-2)×20]	29, [(B+FAII-2)×40]	-
	S ^{※3}	100	100	100	89, (100-FAII-2)	71, (100-FAII-2)	100
	W	50	50	50	50	50	50
	CsCl ^{※4}	試験体中:0.063% 原子量 CsCl: 168.358, Cs:132.905, Cs(0.05%)×168.358/132.905=0.063%					

※1: 前養生の湿潤養生を示す。※2: FAII を結合材(B+FAII-2)に対し, 砂代替で置換した。※3: 新城産硬質砂岩砕砂(絶乾密度:2.61g/cm³, 吸水率: 1.37%), ※4: 試験体中で 0.05%の Cs 濃度となるよう練混ぜ水に混入(W(kg/m³)×0.5%)。

2.2 配(調)合

(1) ペースト試験体

各試料の配(調)合概要を表-2に示す。なお, 総合的な評価を行うため, 表中には既報²⁾の試験体を含めて示した。試料は, N 単味(N), FA を用いたものは, フライアッシュセメント B 種(FB)相当⁴⁾として, セメント質量に対し, FAII-1 を 15%, フライアッシュセメント C 種(FC)相当⁴⁾として, FAII-1 を 25%, FAII-2 を 30%, 大量使用として, FAII-2 を 50%および 70%置換した 5 種類(FA15, FA25, FA30, FA50, FA70)を用意した。また, BFS を用いたものは, セメント質量に対して高炉セメント A 種(BA)相当⁵⁾として BFS-1 を 20%置換した試料(BFS20), 高炉セメント B 種(BB)相当⁵⁾として BFS-1 を 40%置換した試料(BFS40), 高炉セメント C 種(BC)相当⁵⁾として BFS-2 を 70%置換した試料(BFS70)の 3 種類, 合計 9 種類の試料を用意した。試料の水結合材比(W/B)は, 練混ぜ後のブリーディングの発生を避けるために 30%とした。また, 養生条件は, 各試料で生じる水和反応, ポゾラン反応などを十分に進行させるため, 50℃水中とした⁶⁾。

(2) モルタル試験体

各試料の配(調)合概要を表-3に示す。試料は, N 単味ものは養生条件を 20℃水中(NS-1), ペースト試料と同様に 50℃水中(NS-2)の 2 種類とし, FAII を用いたものは, FC 相当⁴⁾として, セメント質量に対し, FAII-2 を 30%置換した試料(FA30S), 大量使用として FAII-2 を FC 相当として 30%置換し, 更に砂代替として(N+FAII)の 20%

(FA30FS20)と 40%(FA30FS40)を置換した 2 種類, BC 種相当⁵⁾として BFS-2 を 70%置換した試料(BFS70S)の 1 種類を用意し, 合計 6 種類とした。試料の W/B は 50%一定とし, FAII, BFS を置換した試料は 50℃水中とした。

2.3 試料の作製および養生

ペーストの練混ぜは, 5L 練りホバート型モルタルミキサ(JIS R 5201 9.2.3)を使用し, 低速で 150 秒間練り混ぜ, 30 秒休止後, 再び低速で 150 秒間練り混ぜた²⁾。モルタル試験体の練混ぜは, JIS R 5201 に準拠した。練混ぜ後は, ペースト試験体, モルタル試験体ともに 4cm×4cm×16cm のモルタル供試体成形用型に流し込み, 直ちにテーブルパイププレート(JIS R 5201 11.2.3)で 120 秒間振動させ成形した。その後, 湿気箱(20±1.0℃, RH90%以上)にて 24 時間養生後に脱型し, 水道水で満たした 50℃に設定した噴流攪拌方式の恒温水槽にて, 4 週, 12 週の養生を行った。なお, モルタル試験体の一部は 20℃に設定した標準養生用の恒温水槽に所定材齢まで静置した。養生後は, 4cm×4cm×16cm 供試体の中心部近傍から 2cm×2cm×2cm の立方体を 1 個切り出し, 水中浸漬試験用試料として用意した。なお, 試料は水準毎に 3 個作製した。

2.4 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4に示す。水中浸漬試験の浸漬液には, 超純水(比抵抗値 18.2MΩ・cm)を用いた²⁾。採取した 2cm 角の試料を 500ml の超純水に浸漬し, 恒温恒湿室(20℃, 湿度 60%)に設置した窒素ガスを充填したグローブボックス内で保管した²⁾。保管中は定期的

に容器内の浸漬液を攪拌した。一定期間浸漬させた後、浸漬液を全量交換し、浸漬液を ICP-MS にて分析した。分析項目は Cs である。なお、ICP-MS の分析に先立ち、pH および電気伝導度(EC)を測定した。

ペースト試料においては、養生期間 4 週の試料は浸漬期間 12 週、分析回数は 4 週時、8 週時、12 週時の 3 回とし、一方、養生期間 12 週の試料は浸漬期間 12 週、分析回数は 4 週時、12 週時の 2 回とした。ただし、既報²⁾で示した FA15, FA25, BFS20, BFS40 は 4 週時の 1 回のみである。同時に N, FA30, FA50, FA70, BFS70 については、2cm 角の試料から細孔径分布の測定用試料を採取した。

モルタル試料においては、養生期間 4 週および養生期間 12 週の試料は浸漬期間 12 週、分析回数は 4 週時、12 週時の 2 回とした。同時に 2cm 角の試料から細孔径分布の測定用試料を採取した。更に、圧縮強度試験体および促進中性化用試験体を作製し、水中浸漬試験の測定時期にあわせて測定を行った。なお、圧縮強度試験体においては、N 単味の試験体では 20℃水中(NS-1)および 50℃水中(NS-2)で養生した試験体を、他の水準では 20℃水中で試験材齢まで養生を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ペースト試料

3.1.1 水中浸漬試験

水中浸漬試験による浸漬液の分析結果を図-1に示す。なお、Nは6個、他は3個の試料の平均値を示す。

(1) pH

いずれの試料においても経時的に小さくなった。Nに比べて混和材を使用すると pH は小さくなり、置換率の増加に伴い小さくなる傾向がみられた。

(2) EC

EC は溶存イオン量をだまかに示す指標である。いずれの試料も経時的に小さくなった。混和材の影響は、置換率の増加に伴い小さくなる傾向がみられた。

(3) Cs

いずれの試料においても、ほぼ経時的に Cs の溶出量は減少した。飽水状態のモルタル内では、練混ぜ水と共に硬化体中に混ぜ込んだ Cs の 80%が可溶性である⁷⁾ことを考慮すると硬化体中の空隙中に存在する Cs⁺が空隙を介して浸漬水中に拡散する現象が卓越していると考えられる。混和材の影響は、養生期間 4 週の場合、Nでは浸漬期間 12 週までの溶出量の累積値が 14.38mg/Lであったが、FB種相当の 15%置換した FA15 では 3.89mg/Lとなり、Nと比較して 30%以下と大幅に低減した。更に、置換率の増加に伴い累積値は小さくなり、FA70では 0.90mg/Lとなり、Nの 6%程度となった。従って、一定量以上の FAII の混入により Cs の溶出量を大幅に抑制でき、更に置換率を増加することで溶出抑制効果が高まる傾向が認められた。一方、BFSでは養生期間 4 週の場合、BFS20, BFS40, BFS70 で溶出量の累積値がそれぞれ 9.56mg/L, 4.78mg/L, 1.77mg/L と置換率の増加に伴い低減する傾向が明確に認められた。

養生期間の影響は、いずれの試料も 4 週に比べて 12 週の溶出量が小さくなる傾向がみられた。Nでは 12 週の累積値が 7.34mg/Lとなり、養生期間 4 週に対して約 50%、FA70では 0.65mg/L と約 30%低減し、BFS70では

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	養生期間(週)	浸漬期間(週)		
ペースト試料, モルタル試料			4	8	12
水中浸漬試験	pH	JIS K 0102	4	○	○※1
	EC	JIS K 0130		○	○
	Cs	JIS K 0133		○	○
細孔径分布※2	水銀圧入法	12	○	-	○
モルタル試験体			測定期間(週)		
圧縮強度	JIS A 5308 附属書 C (B 法)	4	20℃	○	-
			50℃	○	-
促進中性化深さ	JIS A 1153 準拠	水中:4,12 気中:4	12	○※3	-
			4	○	-

※1: 細孔径分布は除く。※2: ペースト試験体は N, FA30, FA50, FA70, BFS70 について測定。※3: NCS-2 は未実施。

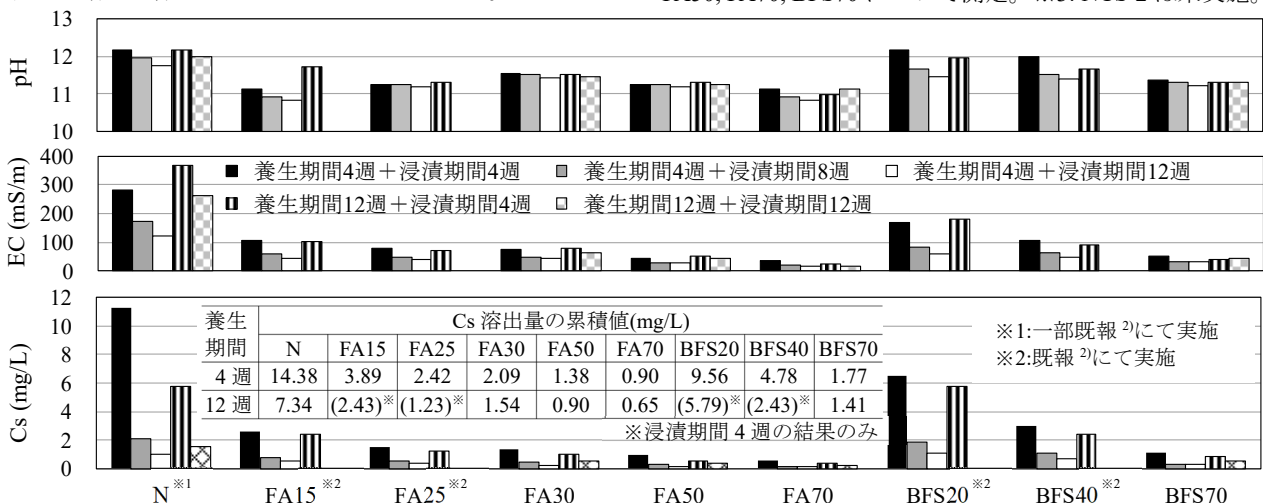


図-1 ペースト試料における浸漬液の分析結果

1.41mg/L と約 20%低減した。従って、所定の養生期間を確保することで、更に溶出量の低減が可能となる。

3.1.2 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-2に示す。全体的に孔径 0.020 μm 以下に分布が集中し、緻密な水和物相を形成しており、FA70、FA50 で空隙率のピークが比較的大きく、BFS70、FA30、N の順で小さくなる。また、FA70 は細孔直径 0.011 \sim 0.013 μm が空隙率のピークであるのに対し、他の試料は 0.004 \sim 0.006 μm であった。N、BFS70 では養生期間、浸漬期間が長くなるのに伴い空隙率の最大値は小さくなる傾向がみられた。表-2に示したように、ペースト試料では W/B を 30%に設定することで練混ぜ後の材料分離を抑制したが、FA の減水効果が作用することで、セメント粒子ならびに FA 粒子周囲に水和反応とポズラン反応に関与しない余剰水が分散した形態で残存⁸⁾する。これにより、N ならびにセメントに準じた反応相を形成する BFS70 に比べて、FA30、FA50、FA70 では、孔径 0.020 μm 以下の空隙率が高まったと推察される。また、FA 置換率を 70%とした場合はその余剰水孔がより多くなるため、孔径も比較的大きくなったものと考えられる。

3.2 モルタル試験体および試料

3.2.1 圧縮強度および促進中性化深さ

図-3にモルタル試験体における圧縮強度と促進中性化深さの測定結果を示す。

(1) 圧縮強度

養生方法の影響は、NS-2 では材齢に伴う強度発現はみられず、50 $^{\circ}\text{C}$ 水中養生による水和反応の進行はみられなかった。混和材の影響は、FAII では、セメント置換のみの試験体に比べ、砂代替としての使用を併用したもので材齢 8 週以降の強度発現が大きくなる傾向がみられた。BFS70S では、FA30FS20 と同様な傾向がみられた。

(2) 促進中性化深さ

前養生の影響は殆どみられなかった。混和材の影響は、FAII、BFC を C 種相当で使用したものは中性化が速く、FAII を C 種相当と砂代替の併用したものは、材齢 24 週時には完全(20mm)に中性化していた。

3.2.2 水中浸漬試験

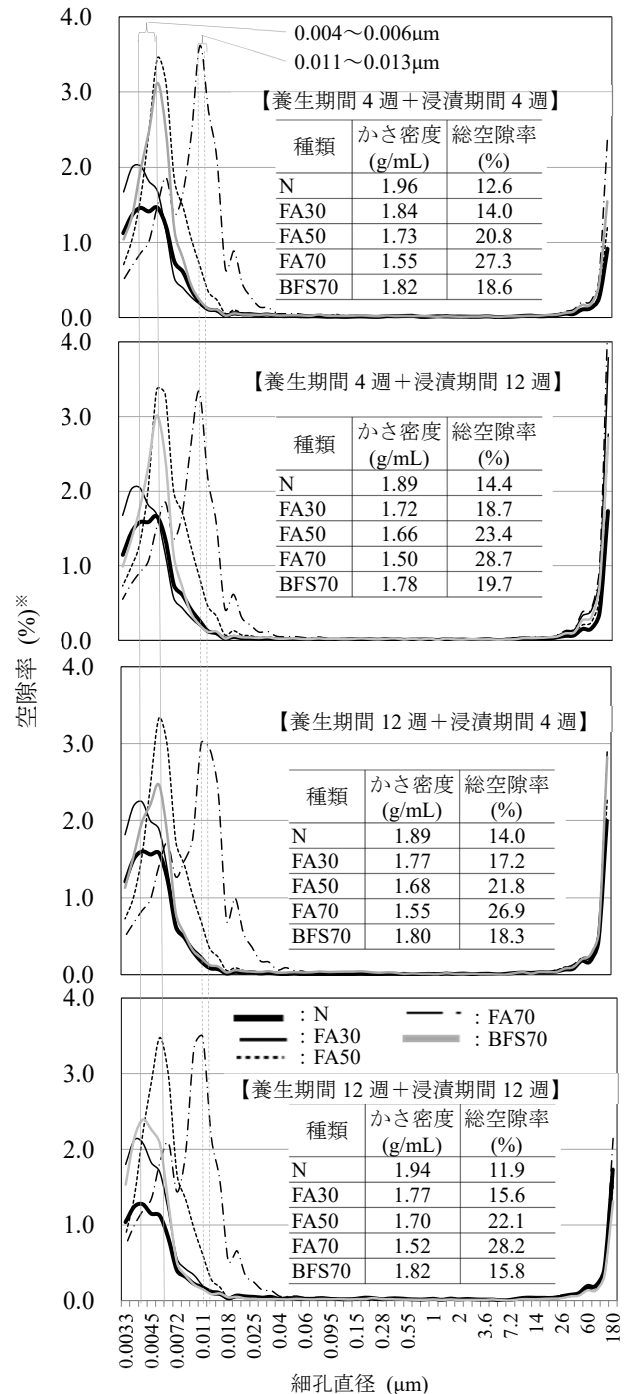
水中浸漬試験による浸漬液の分析結果を図-4に示す。なお、各データは 3 個の試料の平均値を示す。

(1) pH

混和材の混入した試料が N 単味の試料に比べて若干小さくなる傾向がみられた。

(2) EC

いずれの試料においても、浸漬期間により経時的に小さくなる傾向がみられた。混和材の影響は、FAII および BFS の混入に伴い大幅に低下する傾向がみられ、両者ともに C 種相当であればほぼ同等であった。



※空隙率(%)=細孔容積(mL/g)×かさ密度(g/mL)×100

図-2 ペースト試料の細孔径分布測定結果

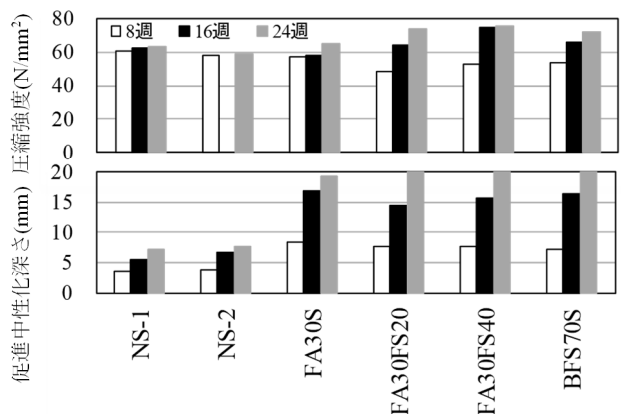
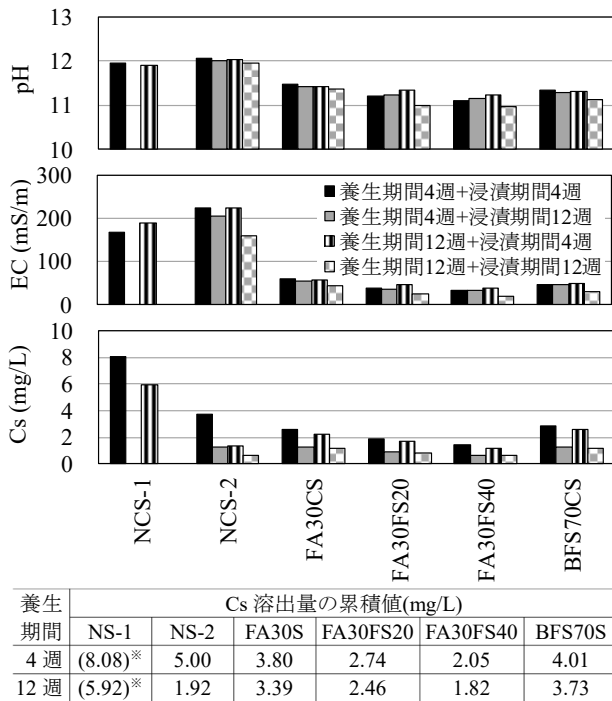


図-3 モルタル試験体の圧縮強度と促進中性化深さ



*浸漬期間4週の結果のみ

図-4 モルタル試料における浸漬液の分析結果

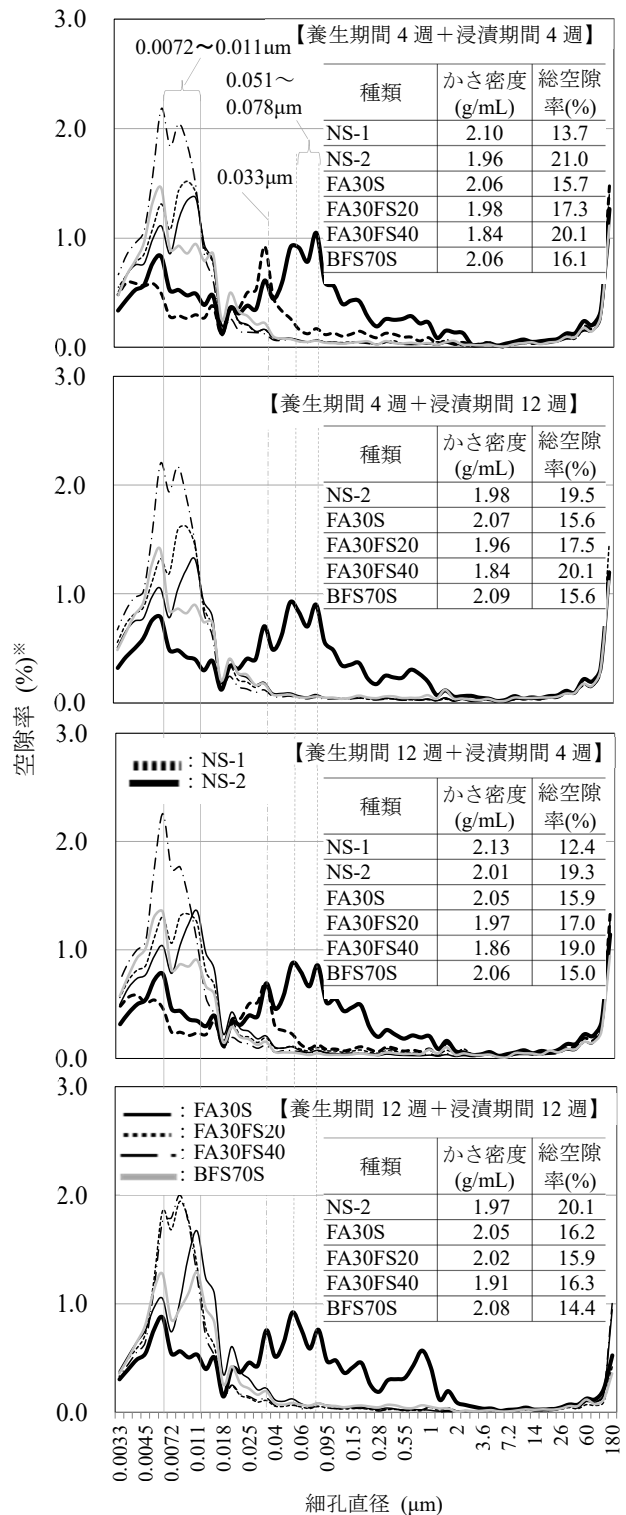
(3) Cs

いずれの試料においても、ペースト試料同様、経時的にCsの溶出量は減少した。養生方法の影響は、20℃水中で静置したNS-1に比べ、50℃の噴流攪拌方式の恒温水槽で養生したNS-2では、養生期間4週では8.08mg/Lに対し、3.71mg/Lと約46%、養生期間12週では5.92mg/Lに対し、1.33mg/Lと約22%となり、大幅に低下する傾向がみられた。養生期間の影響は、4週に比べ12週が低下する傾向がみられた。また、NS-1、NS-2に比べて混和材を混入した試料の溶出量の差は小さい。これはペースト試料の結果からみて、混和材の影響により養生中のCs溶出量は少なかったと考えられる。一方、BFSではC種相当のBFS70SがFA30Sとほぼ同程度であった。

3.2.3 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-5に示す。図-2に示したペースト試料の測定結果と異なり、N単味の試料に対し、混和材を混入した試料が緻密化している傾向が明確に認められた。細孔径の分布でみると混和材を混入したモルタル試料においては、いずれの試料も空隙率のピークは0.0072~0.011μmの範囲であるのに対し、NS-1で0.033μm、NS-2では0.051~0.078μmとなり、粗大な空隙になる傾向がみられた。このことから、NS-2においては養生期間中に多量のCsが溶出した可能性が高い。

空隙率の最大値はFA30FS40、次いで、FA30FS20、FA30SとBFS70Sが続いているが、養生期間12週+浸漬期間12週になると、FA30FS20、FA30S、BFS70Sにおいては他の条件に比べて0.0072~0.011μmの範囲に細孔径分布が集中した。また、総空隙率もFA1Iの混入量が最も



*空隙率(%)=細孔容積(mL/g)×かさ密度(g/mL)×100

図-5 モルタル試料の細孔径分布測定結果

多いFA30FS40では他の条件に比べて3~4%程度、FA30FS20では約1%小さくなった。

3.3 Cs溶出抑制のメカニズム

W/Bを30%としたペースト試料では養生期間と浸漬期間によらず、孔径20nm以下の微細空隙が大部分を占め、FAの置換率が大きくなるほどその微細空隙の量が高まる傾向が認められた。また、FA70では、他の試料ではほぼ存在しない孔径20~40nmの空隙も形成された。

総空隙量は、 $N < \text{BFS70} \approx \text{FA30} < \text{FA50} < \text{FA70}$ となり、空隙径分布および総空隙量と Cs 溶出量 ($\text{FA70} < \text{FA50} < \text{FA30} < \text{BFS70} < N$) の間に相関は認められない。これは、FA のポズラン反応による FA 粒子周囲の外部反応相の形成⁸⁾による屈曲度の増大および Cs 吸着量の増大が影響しているものと考えられる。空隙構造の解析事例として、W/B が 30% の場合に FA の置換率 20~60% で空隙の分散と微細化により屈曲度が無混和ペーストに比べて高まる⁹⁾ことが示されている。一方、BFS70 においても FA30 と同様に屈曲度が高まるが、 Cs 溶出量は FA30 の方が少ない。これは、FA を 25% 置換した場合に C-S-H 相の Ca/Si 比が 1.2~1.8 程度に低下する⁸⁾が、BFS を 70% 混和した場合は C-S-H 相の Ca/Si 比が 2.0 程度に留まる¹⁰⁾こと、そして、C-S-H 相の Ca/Si 比が低いほど Cs^+ の吸着量が高まる¹¹⁾ことに鑑み、C-S-H 相の Ca/Si 比が低下したことによるものと考えられる。

モルタル試料では、NS-2 の養生期間 12 週の試料において養生中に Cs が溶出したと考えられるため、対象としないが、W/B が 50% と高いため、NS-2 の養生期間 4 週では他の試料に比べて孔径 20nm 以上の粗大空隙が多くなった。一方、孔径 20nm 以下の微細空隙の量は、 $N < \text{FA30S} \approx \text{BFS70S} < \text{FA30FS20} < \text{FA30FS40}$ となり、FA をセメント置換と砂代替を併用することで試料中の FA 量が増加し当該空隙量も多くなった。このことは、砂代替で使用した FA はポズラン反応を生じるため、結果的に結合材量が多くなることで骨材界面の遷移帯の影響が低減し、ペースト試料と同様に結合材中の屈曲度が高まる影響、C-S-H の低 Ca/Si 比化による Cs 吸着量の増大による影響が Cs 溶出量の低下をもたらしたものと考えられる。

4. まとめ

FA、BFS の使用によるセメント硬化体からの Cs 溶出抑制効果について検討を行った。

- (1) ペースト試料は、FAII や BFS を一定量置換することにより Cs の溶出量を抑制できた。具体的には、FAII を 15% 以上、BFS を 40% 以上といったセメントで B 種相当以上置換した場合の溶出抑制効果は顕著であった。
- (2) モルタル試料においては、FAII および BFS を C 種相当と多量に置換したもののほど Cs の溶出量が小さくなる。特に、FAII はセメント置換のみならず、砂代替として用いることにより、更に溶出量を低減できる。

以上のことから、FAII、BFS は、一定量以上の混入により Cs の溶出抑制対策として有効であることが確認された。一方、1F 構外では汚染焼却灰の保管容器として、FA を用いたコンクリートの高耐久性が示されている¹²⁾。汚染コンクリート塊から再生骨材を製造し、FA を用いたコンクリート製保管容器を製造する可能性が考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 28~31 年度科学研究費助成事業(基盤研究 C)、「コンクリート塊の低品質再生骨材への再資源化に関する研究(研究代表者:道正泰弘)」(課題番号:16K06593)の助成を受けた。ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 東京電力 HD(株):福島第一原子力発電所 固体廃棄物の保管管理計画~2019 年度改訂について, 2019.6.27
- 2) 道正泰弘, 村上一夫, LE DAI ANH, 陶宇洲:混和材が低品質再生骨材を用いたコンクリートの性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40 No.1, pp.1383-1388, 2018
- 3) Shigeru Terashima, Masahiro Taniguchi, Masumi Mikoshiba and Noboru Imai, Preparation of Two New GSJ Geochemical Reference Materials: Basalt JB-1b and Coal Fly Ash JCFA-1, The Journal of Geostandards and Geoanalysis Vol.22 No.1, pp. 113-117, 1998.6
- 4) 日本建築学会:フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007
- 5) 日本建築学会:高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説, 2017
- 6) 山本武志, 広永道彦:フライアッシュ混合使用による溶脱変質フロントの進行抑制メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64 No.1, pp.206-223, 2008.2
- 7) 伊藤将志, 半井健一郎, 林明彦, 河合研至:モルタル中のセシウムの浸透および溶出挙動における含水状態および浸せき条件の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.210-215, 2013.2
- 8) 山本武志, 金津努:フライアッシュのポズラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63 No.1, pp.52-65, 2007.1
- 9) Qiang Zeng, Kefei Li, Teddy Fen-Chong, Patrick Dangler, Analysis of pore structure, contact angle and pore entrapment of blended cement pastes from mercury porosimetry data, Cement & Concrete Composites, Vol.34, pp.1053-1060, 2012
- 10) 佐川孝広, 石田哲也, Yao Luan, 名和豊春:高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性, 土木学会論文集 E, Vol.66 No.3, pp.311-324, 2010.9
- 11) 嶺達也, 三原守弘, 伊藤勝, 加藤大生:種々のセメント系材料に対するヨウ素・セシウムの吸着試験, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN8410 97-258, 1997
- 12) 森寛晃, 山田一夫, 岩城一郎, 長瀧重義:放射性物質に汚染された焼却飛灰等の保管に用いるコンクリート容器の耐久性実証試験と技術要件, コンクリート工学, Vol.56 No.4, pp.296-303, 2018.4