

再生セメントの有害物質固定化機能と適用性

小西正郎* 松田敦夫** 山本和夫***

1. まえがき

近代の工業化は、豊かな物質社会を形成してきた反面、自然浄化能力を上回る炭酸ガスの放出や多様な化学物質を環境中に蓄積してきた経緯があり、その潜在リスクが顕在化しつつある。他方、このような状況に鑑みて持続成長可能な社会に基軸を転換することを目処に、廃棄物の再利用や環境修復など様々な施策が講じられている。

このような背景から著者らは、コンクリート系廃棄物を再生セメント化して用いる方法について検討した。この方法は、化学施設や原子力施設などの施設の解体において、有害物質で汚染されたコンクリート系廃棄物が発生する場合、汚染解体物を再生セメントモルタルで固化処理することで、廃棄物の再利用と有害物の溶出抑制を図るものである。その一つの特徴は低 pH を示すことであり、既に基礎性状や耐久性に関して報告した¹⁾。在来から、埋立処分される産業廃棄物の適正化処理にはセメント固化処理が多用されているが²⁾、アルカリ側で溶解度が上昇する六価クロムや鉛などの重金属に対しては適用時に十分な配慮が必要であるとされており、これに対して低 pH セメントによる固定化が有効であることも報告されている³⁾。一方、固定化の機構に関わるセメント硬化体中のイオンの拡散挙動について、2nm 以下の微細細孔半径と相関がある⁴⁾ことや、水和物表面の組成に依存する⁵⁾、あるいは OH⁻の逆拡散の影響を受けること⁶⁾等、非常に複雑な現象であることが報告されている。

本稿では、再生セメントの小さな CaO/SiO₂ 比と低 pH という特性に着目して、セシウム、ストロンチウム、ヨウ素および臭素等に関する拡散挙動を調べ、その機構に関して考察した。その結果、再生モルタルは陽イオンおよび陰イオンのいずれに対しても良好な溶出抑制効果を示すことが分かった。また、その機構はカルシウム分の溶脱挙動に相似することから Ca(OH)₂ の溶解に代表されるモルタル自体の溶解との関連が大きいこと等が分かったので報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、高炉B種セメ

ントを用いたモルタルおよび再生セメント製造装置により材齢 25 年、2年のコンクリート塊を原料として製造したものおよび内割で 20%混和したフライアッシュコンクリートを原料としたものの3種類の再生セメント（それぞれ R 再生、N 再生および F 再生セメントと称す）を用いた。再生セメントの製造は、原料コンクリート塊、高炉スラグ微粉末およびアルカリ刺激剤をそれぞれ 55 : 36 : 9 の重量割合とし、助剤として石膏を加えた配合とした⁷⁾。このセメントを用いて、水セメント比 (w/c) を 35、40、50、60%とし7種類のモルタル供試体 (φ100×H200mm) を作製した。表-1に w/c=40%としたときの各モルタルの基本配合を示す。

2.2 試験方法

a. セメントの化学組成分析

試験に用いたセメントの化学組成を JIS R 5202 に基づいて測定した。

b. 拡散セル試験

拡散セル試験容器を図-1に示す。この中央部にダイヤモンドカッターで厚さ約 10mm の円板状に切断した3ヶ月標準水中養生モルタル供試体を装着し、1次および2次側セル内 (容量約 700 ml/ℓ) にそれぞれ元素溶液と精製水を満たして試験を実施した。試験は RUN1 および RUN2 と2回繰り返した。1次側拡散セルに用いた

表-1 モルタルの基本配合

種類	w/c %	単位量(kg/m ³)			
		W	C ^{*1}	S ^{*2}	SP ^{*3}
普通	40	341	874	874	3.5
高炉	40	340	859	859	3.4
R再生	40	320	834	834	13.3
N再生	40	325	834	834	8.3
F再生	40	330	831	831	5.8

*1: C 比重; 普通; 3.13、高炉; 3.03、R、N、F 再生; 2.75、*2: S 細骨材; 鬼怒川産川砂(比重 2.64、FM=2.38)、*3: SP 高性能減水剤(ポリカルボキシル酸系)

表-2 1次側拡散セル元素溶液の成分

RUN No	pH	溶液元素濃度(mg/L)						
		Sr ²⁺	Cs ⁺	Br ⁻	I ⁻	Co ²⁺	Ni ²⁺	Ce ⁴⁺
RUN1	4.7	100	100	100	100	100	100	-
RUN2	3.7	100	100	-	-	100	-	100

*試薬: SrCl₂·6H₂O、CsCl、NaBr、NaI、CoCl₂、Ni(NO₃)₂·6H₂O、(NH₄)₂Ce(NO₃)₆

*土木研究室 **構造研究室 ***技術課

元素溶液成分を表-2に示す。1次側溶液の溶媒は水道水を用いた。試験開始後、セルの注水口はシリコンゴムで軽く栓をし、経時的に両セルから10mlづつを採取して、その溶液中の元素濃度を分析した。セシウム(Cs)は蛍光光度法(FAE)、臭素(Br)およびヨウ素(I)は高周波誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)、ストロンチウム(Sr)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)、セリウム(Ce)は高周波誘導結合プラズマ蛍光光度法(ICP-AES)により定量分析した。

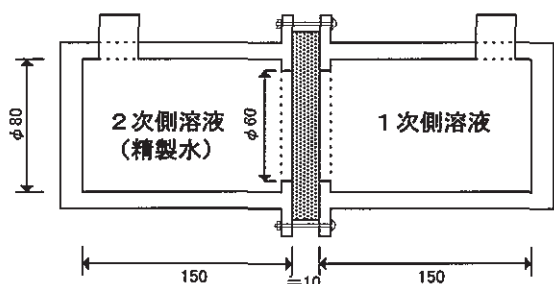


図-1 モルタルを用いた拡散セル試験状況
(モルタル供試体寸法: $\phi 100\text{mm}$, $t=10\text{mm}$)

c. モルタル表面のEPMA分析

拡散試験に用いたものと同一配合のモルタル供試体から切り出した試料を用い、電子線マイクロアナライザ(EPMA)によりその表面の元素分布を調べた。分析に用いた試料は、測定材齢まで標準水中養生したものである。

d. モルタルの細孔径分布測定

測定用試料は拡散試験に用いたものと同一の試料で、測定材齢まで標準水中養生したモルタル供試体から採取した。更に、一片がおよそ5mmの立方体となるように切断し、重量減少がなくなるまで凍結真空乾燥させたものを分析した。細孔直径は水銀圧入式ポロシメータにより(micromeritics社製)0.0045~550 μm の範囲で測定し、全空隙率(V_p)は、試料容積と累積水銀注入量から求まるかさ密度と累積細孔容積との積として算出した。

e. 拡散セル溶液中カルシウム濃度の測定

モルタル試料の溶解挙動と拡散挙動との関係を探る目的でセル内溶液のカルシウム(Ca)濃度を測定した。測定はICP-AESにより、RUN2試験を対象にその他の元素濃度測定と同時に実施した。

3. 試験結果

3.1 セメントの化学組成

普通ポルトランドセメント、高炉B種セメントおよび3種類の再生セメントの化学組成を表-3に示す。表より再生セメントはいずれも普通セメントに比べて、CaOが少なく不溶残分(insol)が多いことが分かる。それに伴い、Ca/Si(=CaO/SiO₂)比が普通セメントの6割程度の値となっている。また、pHも幾分小さい値を示すことも分かる。これらは、製造した再生セメント中に原料コンクリートに由来する成分が多く含まれることに起因していると考えられ、そのことが再生セメントの組成的特徴を形成していると言える。

3.2 拡散セル試験

図-2~5に拡散セル2次側溶液のSr、Cs、Br及びI濃度の経時変化を示す。また、図-6にRUN2として実施したSrの濃度変化を示す。

Co、Ni、Ceについては2次側への拡散は観察されていない。これは、アルカリ雰囲気中で溶解度が低下することや水和化合物を形成する性質をこの種元素が有するため、1次側セル内で沈殿が発生したためと考えられる。実際、1次側に用いた溶液の初期pHは表-2に示すように酸性を示すが、約2ヶ月経過した時点でのセル内の溶液は、表-4に示すように普通、高炉モルタルを用いたもので約pH12~13、再生モルタルを用いたもので約11を示し、拡散セルに装着したモルタルのアルカリ分の影響を大きく受けている。また、2ヶ月経過時点でR再生の1次側溶液中の元素濃度を測定した結果は、Sr、Csでそれぞれ94、100mg/lであるが、CoとCeは0.5mg/l以下と既に溶液内にイオンとしては殆ど存在していないことを確認している。

2次側への拡散が観察された元素について見掛けの拡散係数を算出した。その結果を表-4に示す。

拡散係数は(1)式に示すフィックの第1法則に基づいて求めた。即ち、2次側濃度に比べて1次側濃度が十分高く、なおかつ十分時間が経過した定常状態を仮定して得られる(2)式を用いて算出した⁴⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Da \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$Da = \frac{1}{A} \cdot \frac{l}{C_o} \cdot \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

表-3 セメントの化学組成とpH (単位: %)

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq	S	MnO	els	igloss	insol	計	Ca/Si ^{*1}	pH ²
普通セメント	20.9	4.3	2.7	65.2	1.3	2.3	0.66	0	0.11	1.13	1.0	0.4	100	3.1	13.4
高炉セメント	25.5	8.4	1.9	55.6	3.4	1.4	0.57	0.3	0.23	1.1	1.0	0.6	100	2.2	13.1
R再生セメント	16.7	6.9	1.7	27.6	3.1	1.1	0.35	0.3	0.24	1.11	4.3	36.6	100	1.7	12.6
N再生セメント	17.2	7.3	1.4	33.2	3.4	0.8	0.14	0.3	0.13	1.23	8.4	26.5	100	1.9	12.8
F再生セメント	17.2	7.5	1.6	31.2	3.6	0.8	0.15	0.3	0.15	0.90	7.2	29.4	100	1.8	12.5

*1:CaO/SiO₂の値、*2:重量割合でセメント試料3に対して精製水5を加えた溶液の値

$$Q \doteq V \times C \quad \dots\dots\dots (3)$$

- C : 2次側溶液濃度(mg/l)
- Da : 見掛けの拡散係数(cm²/s)
- A : 試料断面積(cm²)
- l : 試料厚さ(cm)
- Co : 1次側初期元素濃度(mg/l)
- Q : 2次側への元素移行量(mg)
- V : 2次側溶液量(ml)

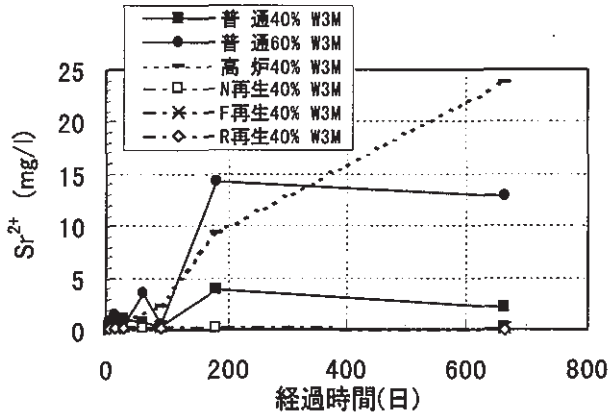


図-2 ストロンチウムの拡散セル2次側濃度(RUN1)
W3M : 標準水中養生、材齢3ヶ月

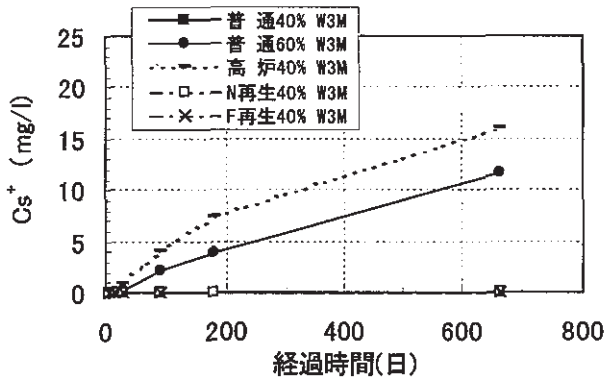


図-3 セシウムの拡散セル2次側濃度(RUN1)
W3M : 標準水中養生、材齢3ヶ月

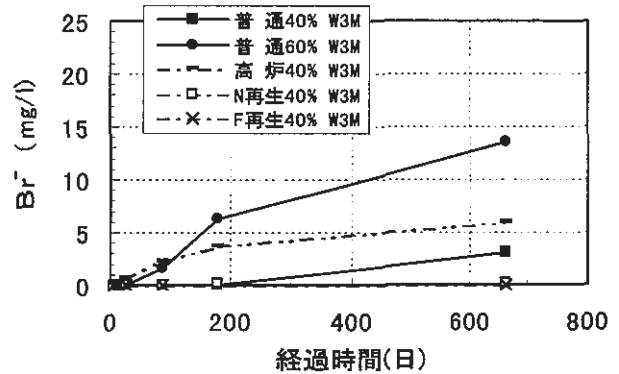


図-4 臭素の拡散セル2次側濃度(RUN1)
W3M : 標準水中養生、材齢3ヶ月

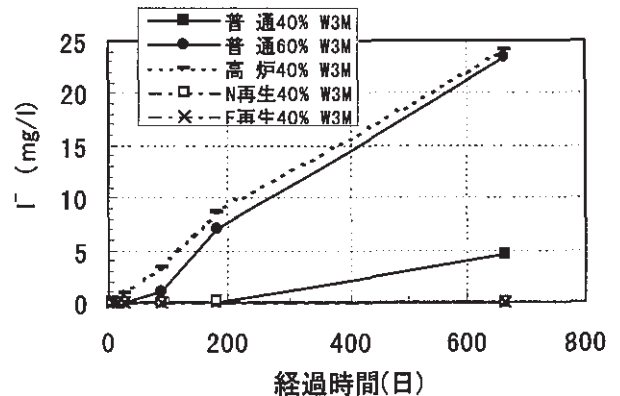


図-5 ヨウ素の拡散セル2次側濃度(RUN1)
W3M : 標準水中養生、材齢3ヶ月

表-4 モルタルの見掛けの拡散係数

種類	RUN	pH ^{*1} (2M)	見掛けの拡散係数(cm ² /s × 10 ⁻⁸)			
			Sr ²⁺	Cs ⁺	Br ⁻	I ⁻
普通40%	RUN1	12.9	6.37	<0.01 ^{*2}	1.50	2.18
普通40%	RUN2	NT	3.15	7.47 ^{*4}	NT ^{*3}	NT
普通50%	RUN2	NT	5.10	14.6 ^{*4}	NT	NT
普通60%	RUN1	12.9	31.7	6.22	7.37	12.8
高炉40%	RUN1	12.3	19.3	8.00	2.66	12.3
R再生35%	RUN2	NT	0.068	6.49 ^{*4}	NT	NT
R再生40%	RUN1	10.5	<0.01 ^{*2}	NT ^{*4}	NT	NT
R再生40%	RUN2	NT	0.51	0.015 ^{*4}	NT	NT
N再生40%	RUN1	11.0	0.44	<0.01 ^{*2}	0.57	0.72
F再生40%	RUN1	11.5	1.36	0.001	0.44	<0.01 ^{*2}

*1: 2ヵ月後の1次側溶液pH、*2: 濃度上昇が無いのため計算不可で0.01 × 10⁻⁸以下の値、*3: NT; 未測定、*4: 本稿中での図示なし

表-4より再生モルタルの拡散係数は何れの元素に対しても普通および高炉モルタルより概ね小さい値を示すことが分かる。これは、図-2~6に示すように2次側への浸出が非常に小さいことから明らかであり、再生モルタルと普通モルタルで元素の拡散挙動に顕著な差があることが分かる。また、RUN1と2でほぼ同様の結果が得られており、供試体の物理的な差によるものではないと言える。

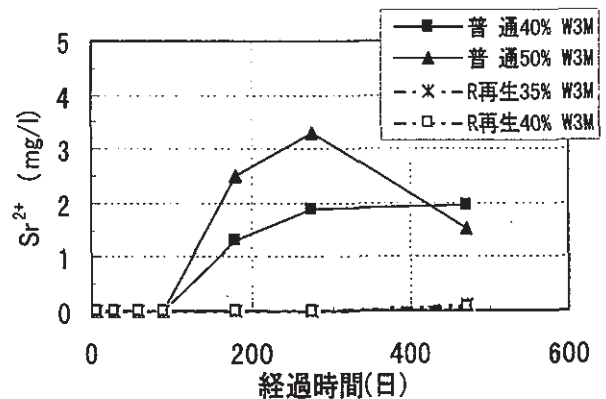


図-6 ストロンチウムの拡散セル2次側濃度(RUN2)
W3M : 標準水中養生、材齢3ヶ月

4. 考察

セメント硬化体中のイオンの拡散挙動は、水和物との化学的相互作用や、表面の電気的性質、細孔構造等の様々な性質が関与するとされている。再生セメントと普通セメントでは表-3に示すように組成や pH などに大きな違いがある。このような特性の差が拡散挙動に及ぼす影響を調べる目的で、モルタル表面の組成、細孔構造及びモルタルの溶解挙動を調べ、その支配的要因について考察した。

4.1 モルタル表面組成の影響について

著者らはペースト表面荷電とネプチニウム (Np) との相互作用をシリカ表面の pH にともなう状態変化との関係で考察してきた。即ち、酸性域では NpO_2^+ が主体となる吸着が、アルカリ域では $\text{NpO}_2\text{CO}_3^-$ 等が主体となる吸着反応を想定した⁸⁾。これは、セメント系材料表面への元素吸着はシリコンに起因するマイナスのサイト (>SiOH) とカルシウムに起因するプラスのサイト (>CaOH) に依存するとし、 Ca/Si ($=\text{CaO}/\text{SiO}_2$) >1 を示す材料の $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 相 (CSH と略称) 表面は負荷電優位となり、 Ca/Si <1 では正荷電が支配的となるモデルに基づいたものである^{5),9)}。ここではこの考えの妥当性を確認するために、pH によってイオン形態の変化が生じにくい陽イオンと陰イオン元素を用いた検討を行った。

拡散セル試験に用いたモルタル供試体の EPMA 分析結果を図-7に示す。3種類のモルタルの CaO 、 SiO_2 の定量値は、それぞれに特徴的な値を示し、 Ca/Si の比を求めれば、図中に示すように普通、高炉、R 再生モルタルに対してそれぞれ 1.3、1.6 及び 0.7 となる。上記のモデルに基づけば、再生モルタルでは Ca/Si 比が 1 以下で負荷電が優位となることから、 Cs^+ 、 Sr^{2+} に対して高い吸着性を Br^- 、 I^- に対しては低い吸着性を示し、その結果陽イオンの2次側拡散セルへの移行は遅く、陰イオンでは速いことが予測される。しかし図-2~6に示すように再生モルタルでは陽イオンおよび陰イオンのいずれに

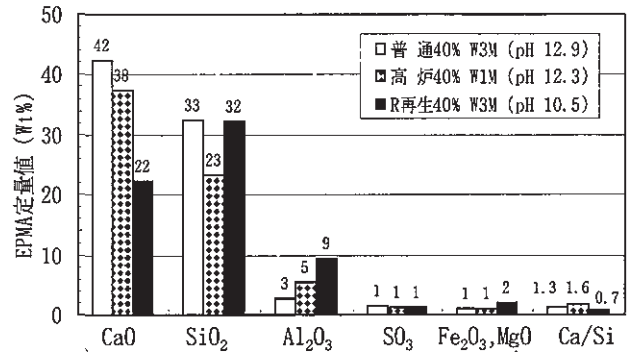


図-7 モルタルの EPMA 分析
(モルタル : S/C=1, W/C=40%, 材齢 1.3 ヶ月, pH は拡散セル内 2 ヶ月時測定値 : 表-4)

対してもその拡散速度は遅いことが分かる。また、 Ca/Si 比の高い普通、高炉モルタルについても陽・陰イオンに対する違いは顕著でなく、むしろ材料の違いの方が顕著に表れている。

以上のことから、本試験で用いた材料と元素に関しては、モルタル中の元素の拡散挙動をシリカ表面の荷電変化による説明だけで解釈することは困難と考えられる。

4.2 モルタル細孔径分布の影響について

モルタル供試体の細孔径分布測定結果を図-8、9に示す。また、表-5にピーク部分である細孔直径 $0.0045 \sim 0.11 \mu\text{m}$ の範囲の細孔径容積とその累計値を示す。図より、再生モルタルの方が、全体的に大きな細孔

表-5 ピーク部分の細孔径容積 (単位 : ml/g)

細孔径 μm	R 再生	普通			高炉	
	W1M	W1M	W3M	W1Y	W2Y	W3M
0.11	0.0004	0.0010	0.0005	0.0006	0.00033	0.0003
0.09	0.0007	0.0015	0.0006	0.0007	0.00037	0.0005
0.065	0.0027	0.0066	0.0025	0.0035	0.00080	0.0011
0.045	0.0030	0.0063	0.0032	0.0030	0.00047	0.0009
累計	0.0068	0.0154	0.0068	0.0078	0.0020	0.0028

*:W1M~2Y(標準水中養生、材齢 1 ヶ月~2 年)

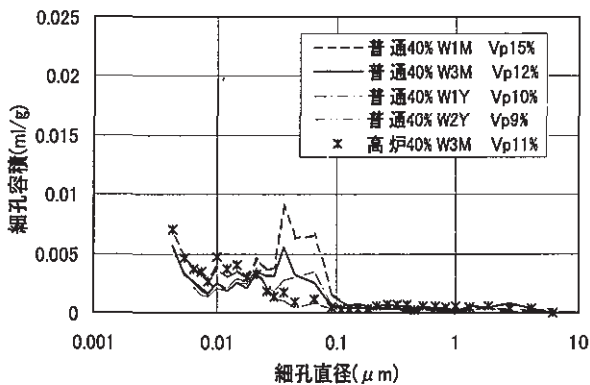


図-8 普通モルタルの細孔径分布
(S/C=1, w/c=40%)

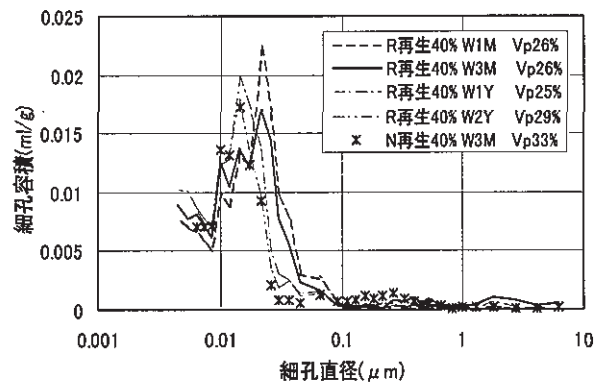


図-9 再生モルタルの細孔径分布
(S/C=1, w/c=40%)

容積を示すことが分かる。また表-5から、普通W1Mモルタルを除いて、ピーク部分の細孔容積も再生モルタルの方が大きいことが分かる。更に、全空隙率 (V_p) で比較すれば、普通モルタルが9~15%であるのに対して再生モルタルは25%以上と約2倍の値を示す。このことから、再生モルタルの空隙分布は、普通モルタルよりも全体的に疎な構造を形成していると言える。拡散セル試験に用いた元素のイオン半径は、およそ0.1~0.2nmの範囲にある¹⁰⁾。モルタルの細孔容積のピーク近傍細孔直径はイオン径の約1000倍となり、元素の主要な拡散経路としては十分な空隙を有するということになる。一方、窒素ガス吸着法で測定される細孔空隙のピークはCSHの層間距離にほぼ一致する2nm付近にあり¹¹⁾、陰イオンが早く拡散する経路となっているとの報告もあるが⁴⁾、全空隙率の主要素であるより大きい径の空隙もそれに付加して拡散経路となると考える方が妥当である。よって、細孔空隙を主要な拡散経路と想定すれば、細孔容積や直径に比例した拡散挙動となるはずであるが試験結果は、その関係を反映していない。

更に図-8から普通モルタルの材齢増加に伴う細孔容積の減少が、図-9からは再生モルタルの材齢増加に伴う細孔直径の縮小傾向が観察される。拡散セル試験に装着した時点のモルタル材齢は3ヶ月であるが、材齢とともに拡散経路となり得る細孔は減少する傾向を示すと言える。図-2~6の90日以降の結果は、Srで若干特異な挙動を示すがその他の元素では大幅に拡散速度が低下する傾向は見られない。

これらの結果から、全空隙率及びピーク部分の細孔容積の大きい再生モルタル内の元素の移行が普通モルタルよりも遅いことを、空隙量やその径の違いのみで説明することも困難であると考えられる。

4.3 モルタル溶解量の影響について

Atkinsonによれば、硬化したセメント系材料の溶解特性を、初期のNa、Kの溶解、その後のCa(OH)₂の溶解、そしてCSHの溶解という一連の変化過程で説明している¹²⁾。また坂本らは、Ca/Si比が小さくなるに従ってpH値も小さくなりCaの溶解速度が遅くなることを示している¹³⁾。このことは、表-3のセメント及び図-7のモルタルのCa/Si比とpH値の測定結果からも明らかであり、Ca/Si比が高い材料で高pH値を示し、CaO量の多い材料ほど高い溶解が生じることを推測できる。これらのことから、本試験においても溶液へのCaの溶脱をモルタル溶解を評価するための一指標として利用した。

1次側および2次側溶液についてCa濃度を測定した結果をそれぞれ図-10及び11に示す。測定は図-6に示した試験と同時に実施したものである。図-10より、普通モルタルでは7日から90日頃までは30~100mg/lとほぼ一定濃度を示し、その後急速な濃度上昇が生じる傾向を示すことが分かる。一方、再生モルタルでは

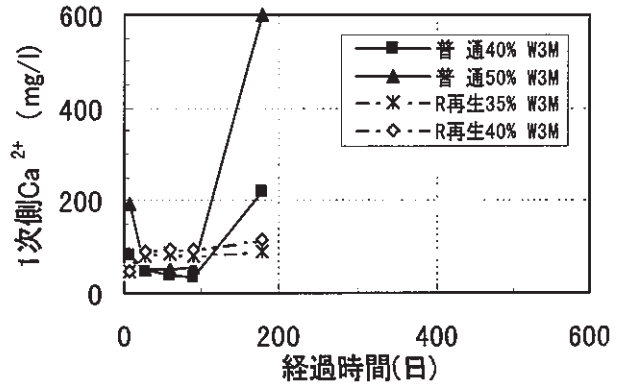


図-10 拡散セル1次側の加減濃度 (モルタル: 3ヶ月材齢、水中養生)

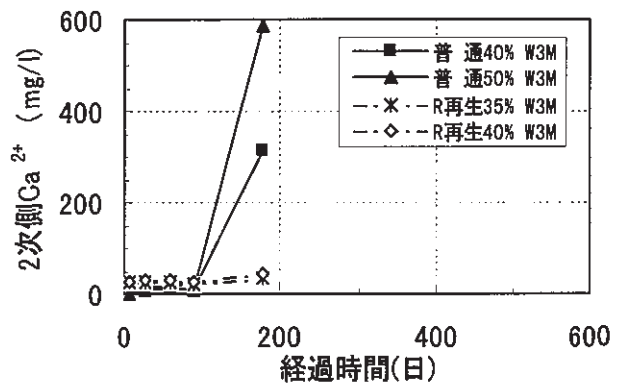


図-11 拡散セル2次側の加減濃度 (モルタル: 3ヶ月材齢、水中養生)

180日時点までほぼ一定濃度を示す。図-11に示すように、2次側溶液の濃度変化もほぼ同様の挙動を示す。なお、1次側の初期のCa濃度が高いのは、溶媒として用いた水道水中に17mg/lのCaを含有していることに由来している。図-10、11と図-6のSrの濃度変化とを比較すれば、普通モルタルで急激な濃度上昇が生じる時期はCa濃度の濃度上昇時期と一致することが分かる。また、図-2、4および5の普通モルタルにおいても、90日から180日にかけて各元素の比較的急激な濃度変化が生じており、Ca濃度に代表されるモルタルの溶解と元素の拡散挙動に関係があることが推測される。この90日頃から濃度上昇が生じる理由は、Atkinsonが示しているようなモルタル溶解の初期には溶解度のより高いKOHやNaOHが律速となり、その後にCa(OH)₂の溶解が律速となる場を形成しているとも考えられるが、この関係については明らかでない。

以上のことをまとめればCaに代表されるモルタルの溶解挙動と元素の拡散挙動の間には密接な関係があると推定され、その概略的な特性はモルタルのCa/Si比とpHで評価することが可能であると言える。そして、このことからCa/Si比が小さくpH値も小さい再生モルタルの溶解速度は普通モルタルよりも緩やかであり、その

ために各元素に対する拡散係数が小さくなると推定できる。また、モルタルの溶解とともに拡散が進行すれば、元素種類、陽イオンと陰イオンの違いによる拡散挙動の違いも小さくなると考えられ、この点でも得られた結果を矛盾なく説明できる。

5. まとめ

コンクリート塊を原料として製造した再生セメントを有害物質で汚染した廃棄物の固化処理材として利用することを目的として、その汚染元素の封じ込め性能を拡散セル試験により調べた。その結果をまとめれば以下のようである。

- i. Cs⁺、Sr²⁺の陽イオン及び Br⁻、I⁻の陰イオンの何れに対しても再生モルタルは良好な拡散抑制効果が期待でき、その見掛けの拡散係数は概ね 10⁻⁹cm²/s オーダー以下の値を示すことが分かった
- ii. モルタルの各元素に対する拡散挙動は、CSH 表面の荷電状態や細孔構造の差に起因するのではなく、むしろモルタル自体の組成に基づく溶解挙動に依存している可能性が高いことが分かった
- iii. CaO/SiO₂ 比及び pH 値の小さい再生モルタルの溶解は普通モルタルに比べて緩やかであり、その結果元素の拡散も緩やかとなることから拡散係数も小さい値を示すと考えられる

以上のことから、再生セメントモルタルは、汚染廃棄物の適正処理に良好な適用性を示す材料であると考えられる。そして、汚染廃棄物の発生する解体事業に廃棄物固化処理用充填材として利用する方法を適切に組み込むことは、発生廃棄物量の再資源化とそれに伴う減量化を有効に図る方法であると言える。

なお、本研究は平成7～9年度の科学技術庁放射性廃棄物処理処分技術開発促進事業として実施した。また、セメント特性及び製造に関して、大有建設吉兼 亨副社長、中央研究所の中島佳郎氏、技術本部の竹島宏侑氏ほかに適切な御助言を賜った。ここに深謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 小西正郎ほか、「再生セメント化による解体廃棄物の減容化処理」、奥村組技術研究年報、No. 25、1999、pp. 1-6 など
- 2) 網本博孝、木村哲雄、「焼却残渣の処理技術」、環境技術、Vol. 27、No. 3、1998、pp. 214-220
- 3) 守屋政彦ほか、「有害重金属含有土壌の固定化技術に関する一考察」、第2回環境地盤工学シンポジウム論文集、地盤工学会 委員会主催シンポジウム No. 106、1997、pp. 73-78
- 4) 後藤誠史ほか、「セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散」、セメント技術年報、Vol. 36、1982、

pp. 49-52

- 5) Heath T.G., et al., 「Thermodynamic Modelling of the Sorption of Radioelements onto Cementitious Materials」 MRS Symp. Proc., Vol. 412, 1995, pp. 443-449
- 6) Ushiyama H., et al., Proc. 6th Int'l Cong. Chem. Cement, Vol. II-1, 1976, pp. 331-337
- 7) 小西正郎ほか、「再生セメント技術の解体廃棄物への適用性」、奥村組技術研究年報、No. 23、1997、pp. 1-6
- 8) Sakamoto Y., 「Migration Behavior of Np(V) in Cementitious Material」, ASME, Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, 2-46, Proc., 1111.pdf, 1999
- 9) 山口貴行ほか、「セメント構成成分への Sr の収着と電気的狀態について」、原子力学会 1997 春の年会予稿集、1997、p. 582
- 10) 「化学便覧 基礎編 II」、丸善、1998、pp. 717-718
- 11) 「毛細管空隙とゲル空隙」、セメント・コンクリート、No. 575、1995、pp. 52-53
- 12) Atkinson, A., 「The Time Dependence of pH within a Repository for Radioactive Waste Disposal」, AERE-R11777, AERA Harwell Oxfordshire, 1985
- 13) 坂本浩幸ほか、「セメントの化学的挙動と長期的安定性」、放射性廃棄物研究、Vol. 3、No. 2、1997、pp. 81-89