

論文 再生路盤材からの 6 価クロムの溶出試験方法および溶出抑制対策に関する検討

森濱 和正*1・渡辺 博志*2・片平 博*3

要旨：コンクリート解体材のほとんどは再生路盤材として再利用されている。しかし、コンクリート解体材からは微量の 6 価クロムが溶出するといわれており、その溶出濃度の確認が必要である。ただし、現状では、再生路盤材を対象とした溶出試験方法はない。そのため、再生路盤材からの溶出に関する検討を行った。また、溶出試験結果が環境基準を満足しない場合の対応として、溶出抑制対策の検討を行った。その結果、溶出試験方法には試料の粒径・粒度が重要であること、抑制対策には鉄鋼スラグが有効であることが明らかになった。

キーワード：再生路盤材, 6 価クロム, 溶出特性, 溶出抑制対策, 鉄鋼スラグ

1. はじめに

コンクリート解体材は、年間 3,000 万 t 以上発生しており、そのほとんどは再生路盤材として再利用されている。しかし、今後は、公共工事の減少や、再生骨材の JIS 化に伴いコンクリート骨材としての利用が考えられる。その際、特に再生骨材 H の製造による細粒分の発生量の増大は避けられない。細粒分をコンクリート用骨材として使用することは容易ではないため、埋戻し材などへの利用が増える可能性がある。細粒分を多く含む埋戻し材は、6 価クロムの溶出濃度が高くなる可能性がある^{1) 2) 3) 4)}。

また、溶出試験結果が環境基準を上回った場合の対策として、還元材として鉄鋼スラグを添加することによる溶出抑制対策が検討されている¹⁾。

前述のとおりコンクリート解体材のほとんどは再生路盤材として利用されているのが現状であり、今後も最も多く利用されること間違いないであろう。そこで、本報告では、これまでの結果¹⁾を踏まえながら、再生路盤材を対象にした溶出試験方法および溶出抑制対策について検討した。検討した主な内容は、溶出試験方法に関しては、試料の粒径・粒度分布、溶出抑制対策については、再生路盤材の粒径・粒度と、鉄鋼スラグの種類および粒径・粒度の組合せによる検討を行った。

2. 溶出試験方法に関する検討

2.1 検討概要

溶出試験方法は、環境基準と密接に関係している。土壌からの溶出に関する基準は、既に環境庁告示（以下、環告という）46 号がある。環告 46 号には、溶出試験方法（以下、環告 46 号法という）と、6 価クロムの溶出濃

度は 0.05mg/L 以下という基準値が定められている。

再生路盤材からの溶出試験の検討にあたって、路盤材は土壌に接していることから、土壌の基準値を参考にする必要があり、環告 46 号法に準じた試験方法を検討する必要があるものと考えた。そのため、溶出試験条件には、試料の粒径・粒度、溶出に用いる溶媒、溶媒と試料の量比（液固比）、溶出時間、溶出操作（振とう方法など）、検液の作製（ろ過方法）があるうち、試料の粒径・粒度に関する検討のみを対象とした。

また、環告 46 号法に準じた試験方法と、使用実態に近い状態の溶出を比較するために、タンクリーチング法（以下、TL 法）⁵⁾による検討を行った。

2.2 試験に用いたコンクリート試料

再生路盤材を想定し、6 価クロムの溶出に関する各種実験に用いたコンクリートは、前回の溶出結果¹⁾を考慮して、環境基準を上回る溶出がある配合とし、水セメント比を 70% とした。コンクリートの配合は表-1 のとおりである。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

100×80×400mm の供試体を作製し、4 週まで湿布養生した。その後、20mm 以下に破碎し、室内で薄く広げて保管したものを再生路盤材の試料とし、所定の材齢時に実験に用いた。以下、試験時の材齢は、破碎後で示す。

破碎後のふるい分け試験結果は図-1 のとおり、望ましい粒度範囲⁶⁾のほぼ上限値であった。

2.3 試料の粒径・粒度の影響に関する実験

(1) 実験方法

粒度に関する実験は、図-2 のように最大粒径を 20mm～1mm まで変化させた連続粒度と、粒度範囲 10～20mm（以下、10-20 と表記）から 0-0.5 までの各粒径別について溶出試験を行った。

*1 (独)土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム総括主任研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム上席研究員 博(工) (正会員)

*3 (独)土木研究所 材料地盤研究グループ基礎材料チーム主任研究員 (正会員)

表－1 コンクリートの配合

最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量(kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 剤
20	4.5	70	46	165	236	856	1032	589 mL	2.4 mL

試験は材齢 4 週で行い、溶出操作は、環告 46 号法に準じて行った。6 価クロムの濃度測定は、JIS K 0058 の 65.2 の吸光光度法によった。用いた測定器の測定限界は 0.005mg/L である。

(2) 実験結果

連続粒度の場合と、粒径別の場合の溶出試験結果は図－3のとおりである。結果は最大粒径の位置にプロットしている。

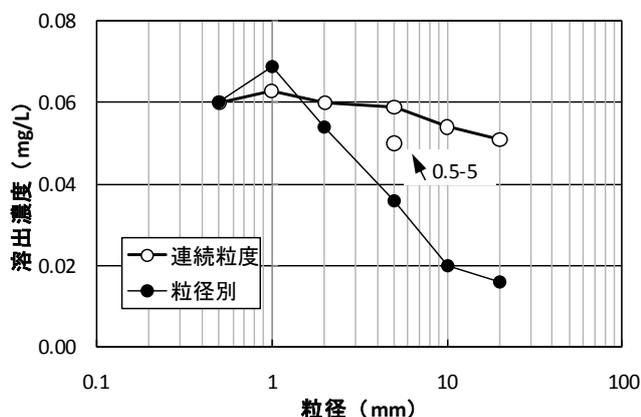
試料 0-0.5 の結果を除いて、粒径が大きくなるほど溶出濃度は低下している。しかし、連続粒度の低下はわずかであるが、粒径別の場合の低下は大きい。粒径が小さいほど溶出濃度が高いことから、粒径別は細粒分が含まれていないために粒径が大きくなるほど濃度の低下は大きい、連続粒度の場合は、細粒分も含まれているために濃度の低下は小さいものと考えられる。粒径 5mm の位置には、線で結ばれている連続粒度 0-5 の結果と粒径別の 2-5 の結果に対し、線で結ばれていない 0.5-5 の結果がそれらの間にあり、この結果も細粒分の存在が濃度に大きく影響していることを示している。

再生路盤材からの 6 価クロムの溶出は、最大粒径と粒度分布の影響が大きく、溶出試験方法の提案にあたっては、これらを決める必要がある。

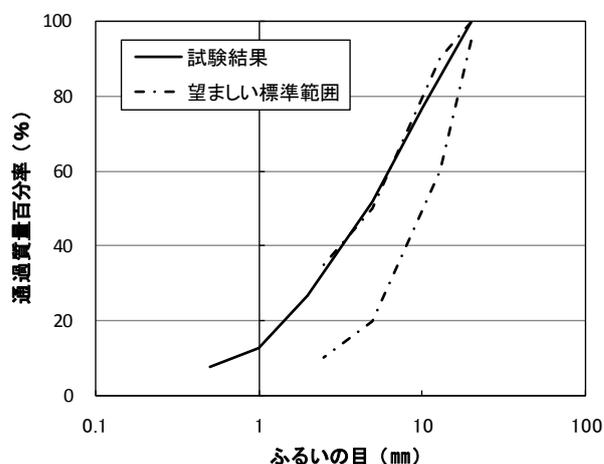
2.4 タンクリーチング試験結果との比較

(1) 実験方法

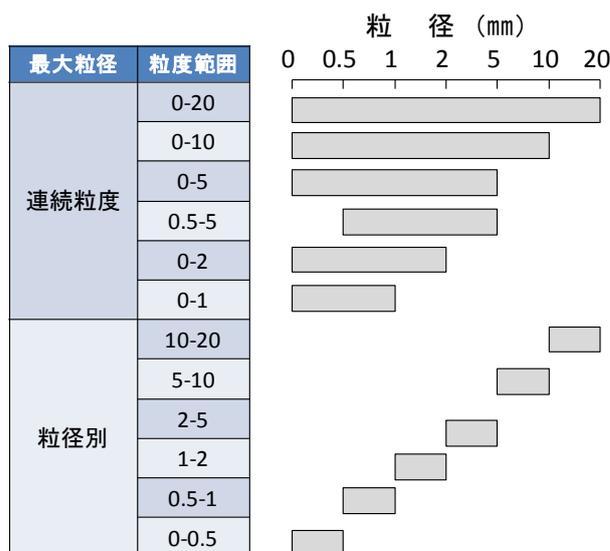
TL 法による溶出試験は、表－2のとおり試験材齢、粒度範囲、溶媒の交換回数を変化させ、6 箇月の時は、長期の溶出特性を把握するため、溶媒の交換を 10 回行った。試験材齢は、4 週、6 箇月、1 年後の 3 回行った。粒度範囲は、0-最大粒径までの連続粒度であり、最大粒径



図－3 連続粒度と粒径別の溶出試験結果



図－1 ふるい分け試験結果



図－2 溶出試験に用いた連続分布と粒径別の範囲

表－2 TL 法の実験内容

試験材齢	粒度範囲 (mm)	溶媒の 交換回数
4 週	0-2	4 回
	0-5	
	0-10	
	0-20	
6 箇月	0-2	10 回
1 年	0-2	5 回
	0-5	

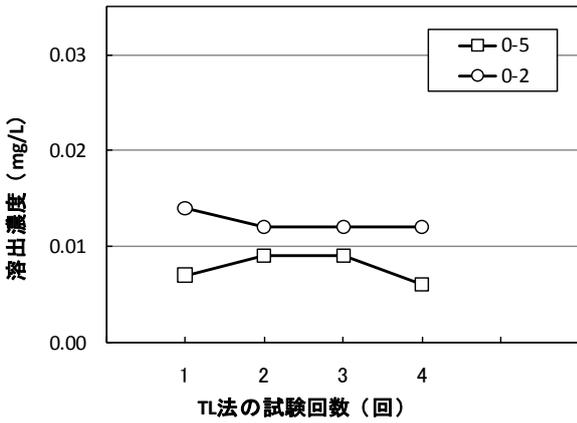
は 2mm, 5mm, 10mm, 20mm の 4 種類である。

試験方法は、土木学会規準 JSCE-G 575 に準じて、溶媒の交換を 24 時間ごとに行った。ただし、TL 法の液固比は、試料の表面積に応じて定めることになっているが、ここでは表面積の測定ができないため、環告 46 号法に合わせた。溶媒の交換回数は、最初の試験では土木学会規準どおり 4 回としたが、長期間の溶出の傾向を把握す

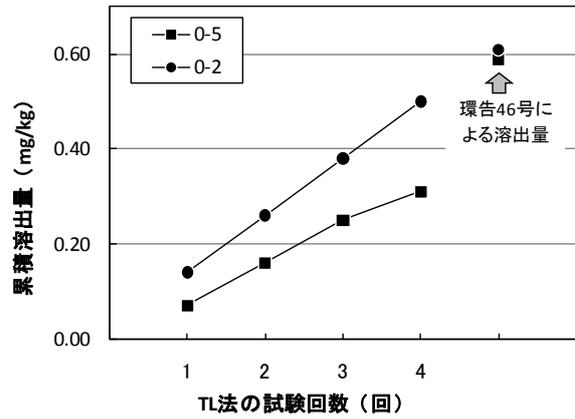
るために、それ以後は表 2 のとおり回数を増やした。6 価クロムの濃度測定は、JIS K 0058 の 65.2 の吸光光度法による。

(2) 実験結果

TL 法の試験結果は図 4～6 のとおりである。各図は、(a) 図と (b) 図の 2 図あり、(a) 図は溶媒交換回数ごとの溶出濃度であり、(b) 図は各回の溶媒交換時の溶出濃度

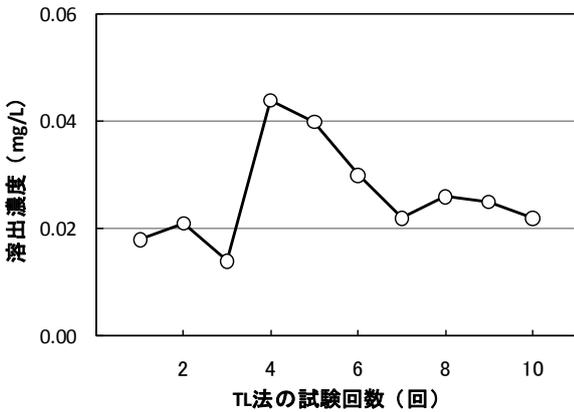


(a) TL 法による溶出濃度

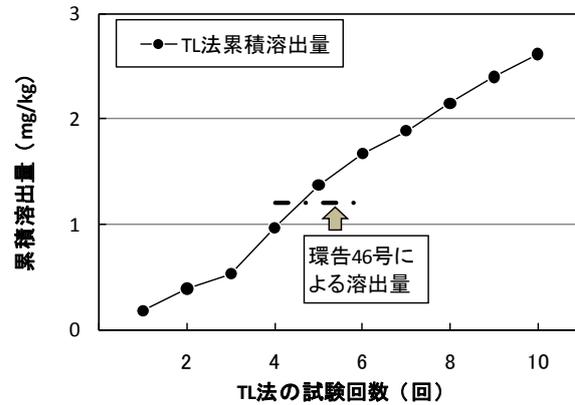


(b) 累積溶出量

図 4 破碎 4 週後のタンクリーチング試験結果

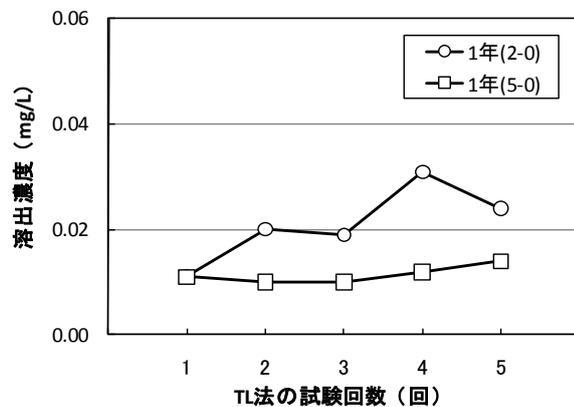


(a) TL 法による溶出濃度

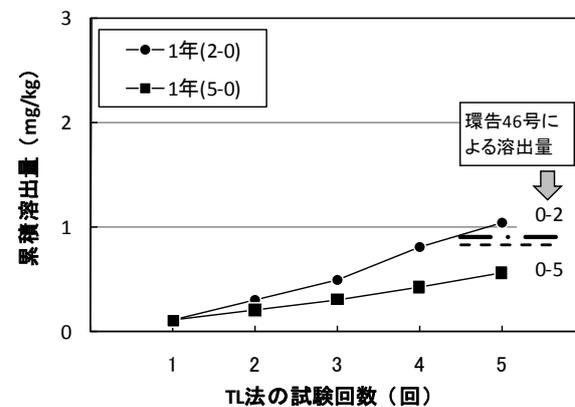


(b) 累積溶出量

図 5 破碎 6 箇月後のタンクリーチング試験結果



(a) TL 法による溶出濃度



(b) 累積溶出量

図 6 破碎 1 年後のタンクリーチング試験結果

から溶出量を算出し、累積した結果である。また、(b) 図には、環告 46 号に準じた溶出試験結果から溶出量を算出した結果も示している。

図-4 に粒度範囲 0-10 と 0-20 の結果がないのは、濃度が測定器の測定限界以下であったためである。

各(a)図の各回の溶出試験結果は、通常、1回目の溶出濃度が高く、しだいに低下するといわれているが、今回の結果は必ずしもそのような結果にはなっておらず、6箇月後、1年後の0-2mmの結果は4回目が最大になっている。図-5の10回繰返しの結果は、4回目のピークの後も濃度は0.02mg/L程度と低いものの、溶出が続いており、水に常に接している厳しい条件の下では溶出が長期間継続することが懸念される。

各(b)図の溶出量の累積結果は、溶出の継続に伴い、溶出量も増加している。環告46号法に準じた溶出試験結果から算出した溶出量は、いずれの結果もTL法の4~5回に相当していた。

3. スラグによる6価クロムの溶出抑制に関する検討

3.1 実験方法

再生路盤材は、2.2と同じものを使用した。

溶出抑制のために還元材として用いたスラグは、高炉徐冷スラグ、転炉スラグ、電気炉スラグA~Cの3種類、合計5種類である。スラグの組成は表-3のとおりである。

高炉徐冷スラグは還元能力の高い硫酸イオンが含まれている。その他(鉄系)のスラグは0~+2価の鉄による還元能力が期待される。鉄系のうち、転炉スラグについては2価鉄の比率が電気炉系スラグに比べて高く、また塩基度(CaO/SiO₂比)もこれらのスラグで異なる。

再生路盤材とスラグの組合せ、スラグの添加率は、表-4のとおりとした。スラグの最大粒径は、再生路盤材の最大粒径が20mm、10mmの場合は、10mm、5mm、2mm、5mmの場合、5mmと2mm、2mmの場合、2mmである。ただし、電気炉スラグは6価クロムの溶出抑制効果が低いことから、2mmのみとした。

スラグの添加率は、前報の結果¹⁾を参考に、高炉徐冷スラグは10%まで2%ずつ、転炉スラグは30%まで10%ずつ増やし、電気炉スラグは15%、30%、50%とした。

試料とスラグの混合は、気乾状態のもの所定量をビニル袋に入れ、水を表乾になるまで徐々に加えながら激しく振ることによって行った。

試験は混合後24時間で行った。材齢は4~5週である。

3.2 実験結果

実験結果は、図-7~10のとおりである。

(1) 高炉徐冷スラグの溶出抑制効果

図-7より、高炉徐冷スラグの溶出抑制効果はきわめて高いことが確認できる。試料からの溶出濃度は0.06~0.07mg/L程度に対して、還元材を2%添加しただけで溶

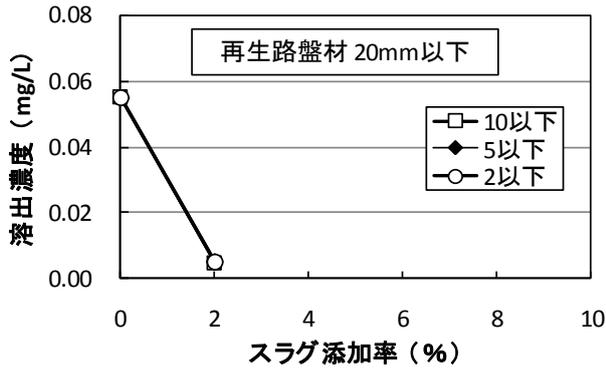
表-3 スラグの組成

(単位: %)

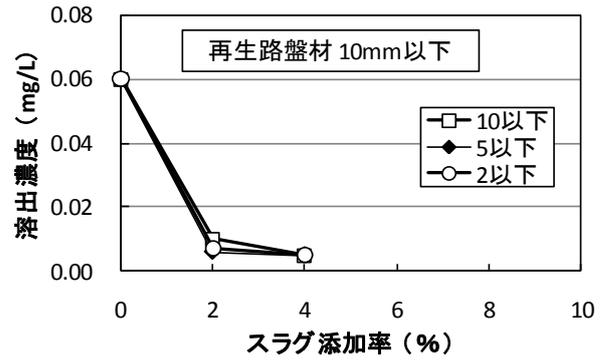
スラグの種類	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	T.Fe	M.Fe	FeO	S
高炉徐冷スラグ	41.0	34.2	14.8	7.2	0.4	0.03	0.6	0.2	-	0.60
転炉スラグ	42.9	11.2	2.0	2.9	1.5	2.50	17.0	4.1	7.3	0.07
電気炉A	4.7	17.2	37.0	4.9	13.0	0.01	12.5	1.0	13.5	0.01
電気炉B	9.8	20.5	22.9	6.1	9.3	0.03	20.5	0.6	1.0	0.03
電気炉C	29.9	24.5	18.7	5.9	3.8	0.06	8.6	0.8	3.0	0.17

表-4 再生路盤材とスラグの組合せ

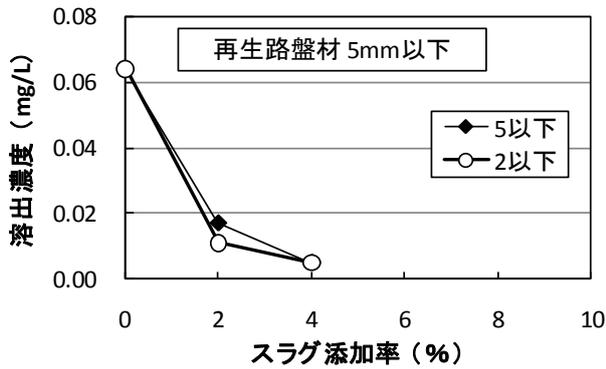
再生路盤材の最大粒径 (mm)	還元材		
	種類	最大粒径 (mm)	添加率 (%)
20 以下	高炉徐冷スラグ	10、5、2	2、4、6、8、10
	転炉スラグ	10、5、2	10、20、30
	電気炉スラグ A、B、C	2	15、30、50
10 以下	高炉徐冷スラグ	10、5、2	2、4、6、8、10
	転炉スラグ	10、5、2	10、20、30
	電気炉スラグ C	2	15、30、50
5 以下	高炉徐冷スラグ	5、2	2、4、6、8、10
	転炉スラグ	5、2	10、20、30
	電気炉スラグ A、B、C	2	15、30、50
2 以下	高炉徐冷スラグ	2	2、4、6、8、10
	転炉スラグ	2	10、20、30
	電気炉スラグ A	2	15、30、50



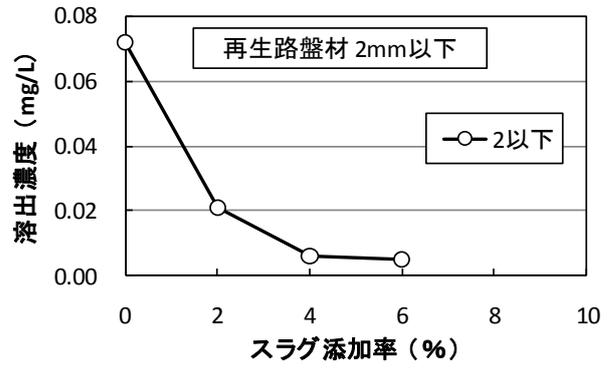
(a) 再生路盤材の最大粒径：20mm



(b) 再生路盤材の最大粒径：10mm

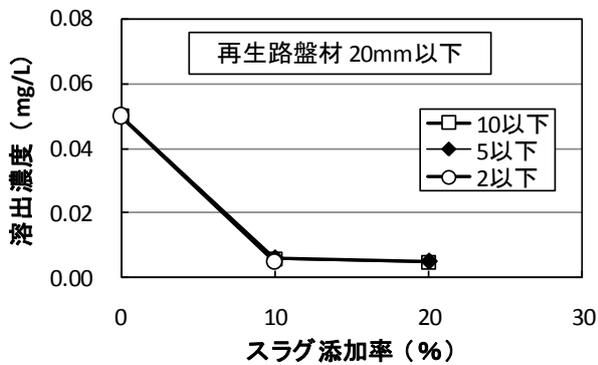


(c) 再生路盤材の最大粒径：5mm

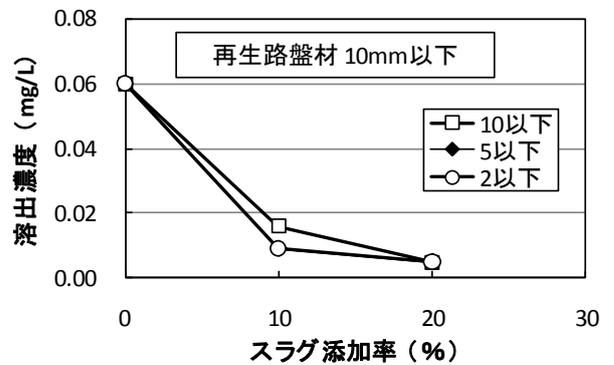


(d) 再生路盤材の最大粒径：2mm

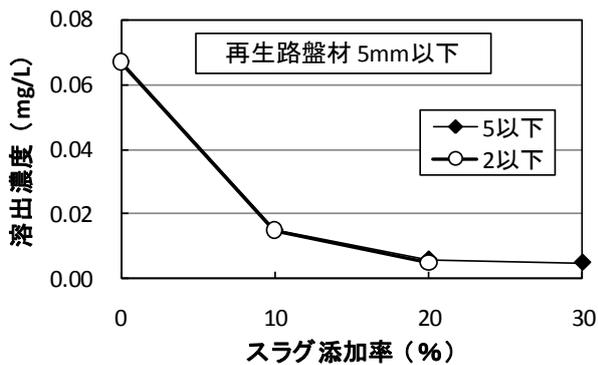
図-7 高炉徐冷スラグの溶出抑制効果



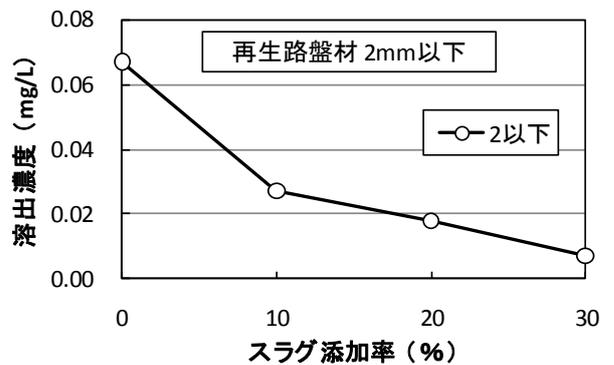
(a) 再生路盤材の最大粒径：20mm



(b) 再生路盤材の最大粒径：10mm



(c) 再生路盤材の最大粒径：5mm



(d) 再生路盤材の最大粒径：2mm

図-8 転炉スラグの溶出抑制効果

出濃度は大きく低下し、環境基準である 0.05mg/L を下回り、0.02mg/L 以下になっており、それ以上の添加による溶出濃度の低下は小さい。

特に最大粒径が大きい試料ほど溶出濃度が小さくなることから、抑制効果も大きくなっており、最大粒径 20mm では、2%添加しただけで検出限界以下になった。

試料の最大粒径と、スラグの最大粒径の関係は、(a) 図の試料の最大粒径 20mm の結果は、スラグの最大粒径にかかわらず 2%添加でデータは重なっており、違いを確認することはできない。(b) 図、(c) 図の試料の最大粒径 10mm と 5mm の結果では、スラグの最大粒径を小さくすることにより抑制効果はわずかに高くなっている。

(2) 転炉スラグの溶出抑制効果

図-8より、転炉スラグの溶出抑制効果は、添加率は異なるものの高炉徐冷スラグと同じように、転炉スラグを添加すると溶出濃度は大きく低下している。高炉徐冷スラグ 2%添加、4%添加と、転炉スラグ 10%添加、20%添加したときの濃度は、ほぼ同じになっていることから、今回使用した転炉スラグの抑制効果は高炉徐冷スラグの 1/5 程度と考えられる。

(3) 電気炉スラグの溶出抑制効果

電気炉スラグを添加した結果は、図-9と図-10のとおりである。高炉徐冷スラグ、転炉スラグとは異なり、ほぼ直線的に低下する傾向を示している。しかし、低下割合は、最大 50%まで添加したにもかかわらず、試料(スラグ添加率 0%のときの溶出濃度)の 1/2 も低下していない。電気炉スラグの溶出抑制効果が期待できないとしても、電気炉スラグから 6 価クロムが溶出しないのであれば、添加率に応じて溶出濃度が低下する、希釈効果は期待されるものと考えられる。

それにもかかわらず、添加率に応じた溶出濃度の低下が期待できないのは、電気炉スラグを添加したことにより、スラグが試料の細粒分を分散させる役割を果たし、溶出しやすくなったことが考えられる。そのため、電気炉スラグ添加分の希釈効果による濃度低下さえ期待できなかったものと考えられる。

4. まとめ

再生路盤材を想定した最大粒径 20mm までのコンクリート試料について、粒径・粒度を変化させたときの 6 価クロムの溶出試験、スラグによる溶出抑制対策の検討を行い、次のことがわかった。

- (1) 6 価クロムの溶出に及ぼす試料の粒径・粒度の影響は大きく、特に細粒分の影響は大きい。
- (2) 試料 2mm 以下、5mm 以下の環告 46 号法に準じた溶出試験結果は、TL 法の 4~5 回の累積溶出量とほぼ一致した。

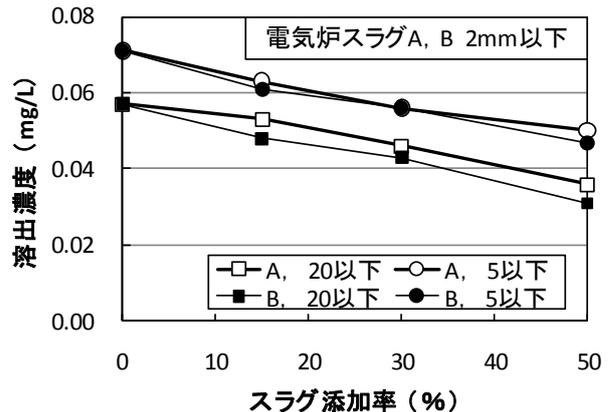


図-9 電気炉スラグ A, B の溶出抑制効果

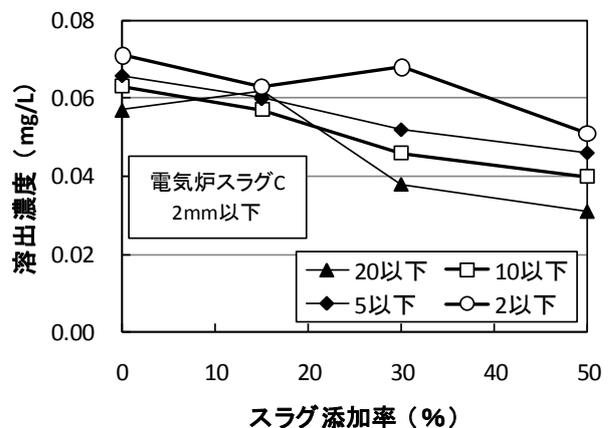


図-10 電気炉スラグ C の溶出抑制効果

- (3) 高炉徐冷スラグの抑制効果は高い。転炉スラグの抑制効果は、今回の結果では高炉徐冷スラグの 1/5 程度であった。

参考文献

- 1) 森濱 和正ほか：コンクリート解体材からの 6 価クロム溶出の特性、簡易試験法および抑制対策に関する検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1505-1510, 2010.7
- 2) 高橋茂：セメントに含まれる微量成分の環境への影響、セメント・コンクリート, pp.20~29, 2000.6
- 3) 坂井悦郎ほか：コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題、土木学会コンクリートライブラリー111, 2003.3
- 4) 森濱和正ほか：再生骨材から溶出する 6 価クロムの溶出試験方法の検討 その 1 不溶残分と 6 価クロムの溶出, 第 64 回セメント技術大会講演要旨, pp.178-179, 2010.5
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 (2010 年制定) [規準編] 土木学会規準および関連規準, pp.344-347, 2010.11
- 6) (社)日本道路協会：舗装再生便覧, pp.18, 2010.11