

再生骨材からの溶出物質の環境安全性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：基礎材料チーム

研究担当者：渡辺 博志、森濱 和正、片平 博

【要旨】

コンクリート解体材は、ほとんどが再生路盤材などに再利用されている。しかし、再生材から微量の 6 価クロムが溶出するが、溶出に関する知見は必ずしも十分ではない。溶出試験方法は、現在のところ環告 46 号法などがあるが、試料の調整方法（形状、粒子寸法等）が再生材の評価に適したものではないなどの問題があり、コンクリート再生材に関する有害物質の溶出の実態把握、溶出試験方法とその評価法、溶出抑制対策に関して検討した。

その結果、溶出の要因を把握し、判定試験方法、現場で簡易・迅速に試験できる簡易試験方法、その結果の評価法を提案した。また、溶出濃度が基準値を上回る場合でも安全に有効利用できる溶出抑制対策を提案した。

キーワード：コンクリート再生材路盤材、6 価クロム、溶出、判定試験方法、溶出抑制対策

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。また、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、再生埋戻し材などへの利用が増える可能性がある。細粒分を多く含む再生埋戻し材は、6 価クロムの溶出濃度が高くなる可能性がある。

再生路盤材や再生埋戻し材（併せて、以下、再生材という）を安全に有効利用するためには、6 価クロムの溶出実態、溶出要因を把握すること、その上で溶出試験方法を確立し、溶出試験結果を評価する方法を確立することが必要である。

また、溶出試験結果が環境基準を上回った場合、大量の廃棄物が発生することが懸念されるため、溶出抑制対策も検討した。

2. 溶出実態

2.1 実態調査の概要

まず、6 価クロム溶出の実態を把握するために、再生路盤材として流通している再生クラッシュラン（RC）の溶出試験と、一部は実際に RC が利用された路盤を掘り起こして採取した試料の溶出試験を行なった。

用いた溶出試験方法は、環境庁告示 46 号¹⁾（以下、

環告 46 号法という）である。環告 46 号法は、2mm 以下の試料を用いるが、一部は利用有姿（再生材に製造されたそのままの粒度状態）については、土木学会規準 JSCE G575²⁾（タンクリーチング試験（TL 法））に準じた試験も行なった。

2.2 再生クラッシュランからの溶出実態

全国から採取した 26 種類の再生クラッシュランと、掘り起こした 6 種類の試料の溶出試験を行なった。

溶出試験結果は図 2-1 のとおりである。No.1～26 までが RC、No.27～32 が掘り起こした試料である。全 32 種類の試料のうち 19 種類については、吸光光度法の検出限界である 0.005mg/L 以下の溶出量であった。特に「掘り起こし試料」である No.27～32 の試料では全て 0.005mg/L 以下であった。有姿による試験結果は、概ね環告 46 号法の 1/2 以下の値であった。

各 RC 試料の粒度分布を図 2-2 に示す。図 2-2 には、舗装再生便覧による RC の望ましい粒度範囲を太線で示している。今回採取した試料の粒度範囲は望ましい粒度範囲に比較して全体的にやや細かめの範囲に位置している。一般的に、粒度が細くなるほど比表面積が増加して溶出しやすくなると考えられる。図 2-2 に示す各 RC の粒度分布から 5mm 以下の粒子の占める割合を試料ごとに求め、これと 6 価クロムの溶出量との関係を図 2-3 に示す。これによると、溶出量にはバラツキがあるが、その上限は RC 粒度の 5mm 以下の割合と比較的線形関係にある結果となった。図 2-2 に示すように RC の望ましい粒度範囲では、5mm 以下の粒子

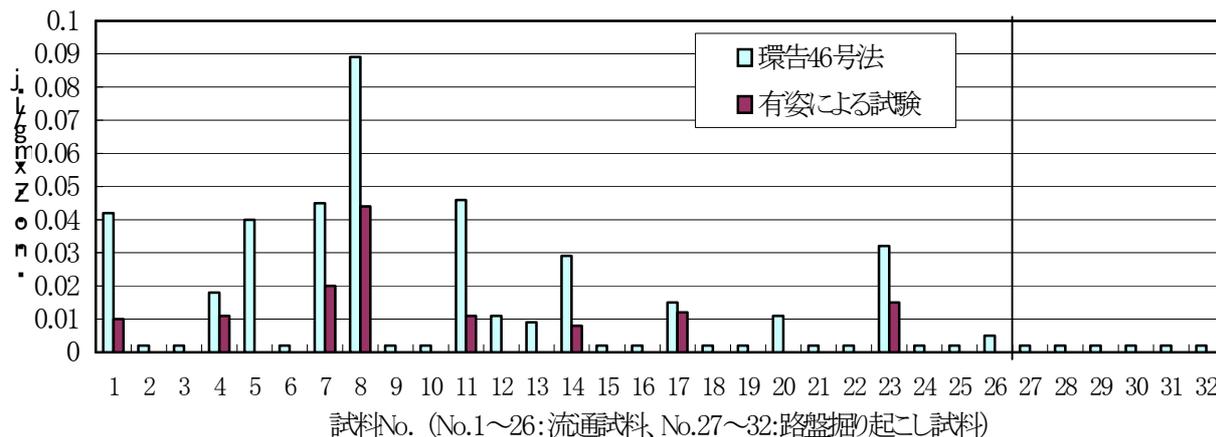


図 2-1 再生クラッシュランの溶出試験結果

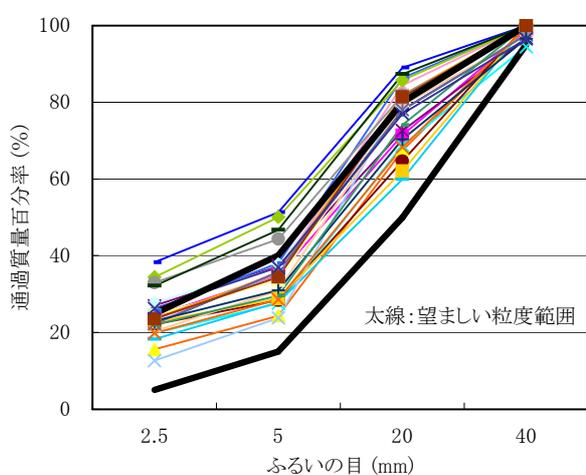


図 2-2 RC の粒度分布

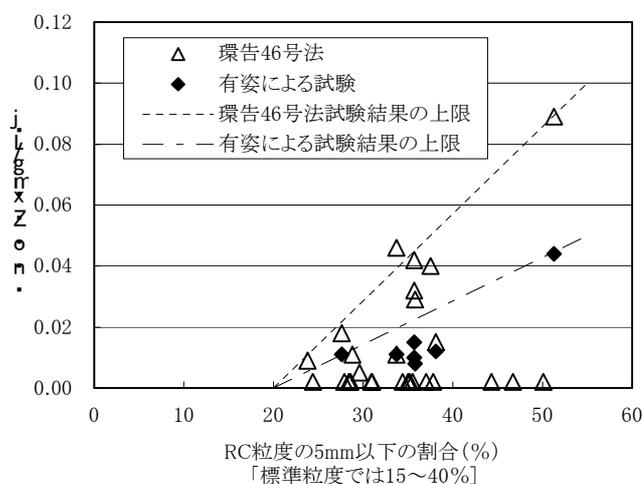


図 2-3 RC の 5mm 以下の割合と溶出の関係

の占める割合は 15~40%である。その粒度範囲の試料を対象とした試験結果では、図 2-3 に示すように環告 46 号法で 0.05mg/L 以下、有姿による試験方法で 0.02mg/L 以下の値であった。

以上のように、この実態調査の結果では、RC からの溶出は、粒度分布に大きく依存する結果であった。

3. 溶出試験方法とその結果の評価に関する検討

溶出に対する安全性を考慮して再生材としての利用が可能かを判定するための溶出試験方法、あるいは溶出抑制対策を講じた場合の安全性を検討するにあたって、溶出試験方法と、試験結果の評価は相互に関係していることから、それらの考え方を整理した。

3.1 溶出試験方法

溶出の判定に用いる試験方法は、用途によっては既にその方法が定められている。産業廃棄物の埋立てについては環告 13 号法³⁾、土壌に関しては環告 46 号法

が定められている。埋戻し材料として再生コンクリート砂を使用する場合は、国土交通省では環告 46 号による測定を行うことになっている⁴⁾。しかしながら、再生路盤材については未だに溶出試験方法が定められていないため、現状では環告 13 号法または 46 号法が用いられている。再生材に対してこれらの方法が適しているのかどうかの確認、あるいは再生材に適した溶出試験方法の確立が必要と考えられる。

一方で、例えば JIS A 5032 (一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ) が 2006 年に制定された。この JIS 規格は、加熱アスファルト混合物用骨材および路盤材として用いる溶融スラグの品質について規定したものである。環境側面の規定として、溶出量と含有量が規定されていて、溶出試験方法は、JIS K 0058-1 (スラグ類の化学物質試験方法—第 1 部:溶出量試験方法)によるものとされている。溶融スラグを対象とした規格であり、再生骨材とは異なるため、同じ試験方法が流用できるとは限ら

ない。しかし、副産物に起因する材料の環境安全性に対する評価方法の考え方や骨子を統一しようとする試みがなされている状況にあり参考になるものであろう。

溶出試験は、試料からの6価クロムの溶出方法と、溶出した6価クロム濃度の測定で構成される。濃度の測定には、JIS K 0102(工場排水試験方法)があり、1964年に初版が制定されている。これまでの実績や普及状況をふまえると、ここに新たな検討課題を提起するものではないと考えられる。一方、検討を要する課題として溶出方法が挙げられる。溶出方法は、溶出に用いる試料の粒度の考え方、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)を決める必要がある。再生材からの溶出に対して、これらの条件をどのように決めるのかという問題がある。先に、溶融スラグの規格例を示したが、試料の調整方法も含め溶出方法については、由来となる試料固有の特性が関与することもあるので、必ずしも画一的な試験方法のみでよいとはならないと考えられる。コンクリートを解体して製造される再生材にあった適切な溶出方法を設定するためには、再生材からの長期の溶出挙動などと、溶出試験結果の関係を明らかにしておく必要がある。

3.2 簡易溶出試験方法

溶出の判定試験方法は、3.3で検討するとおり環告46号をベースにすべきと考えている。その際問題になるのが、試験結果が得られるまでの時間とコストである。さまざまな解体材が再生材として処理され、搬出されるため、溶出試験の頻度は比較的高くなることが予想されるため、迅速に、安価に判定できる試験方法が必要であり、現場で簡易に判定できる試験方法(簡易試験)の確立も必要と考えられる。

3.3 判定基準と溶出試験方法

判定基準は、人体への安全性などを考慮して定められており、土壌からの溶出は0.05mg/L以下と定められている。その際に用いる試験方法は環告46号法である。

再生路盤材、再生埋戻し材の溶出判定試験を検討す

るにあたり、これらの再生材は土壌に接していること、試験条件が違えば、溶出濃度も変化することから、判定に使用する溶出試験方法は、環告46号法に準じるべきと考えられる。そのため、再生埋戻し材については、国土交通省では環告46号法を用いることになっている。ただし、再生路盤材については粒度が異なるため、路盤材に適した粒度を検討する必要があるものと考え、次章の溶出試験方法の検討では、主に試料の粒度について検討することとし、そのほかの溶出試験条件は環告46号に準じることとした。

4. 溶出試験方法の検討

溶出試験方法を検討するにあたり、まず再生材からの溶出特性の検討を行なった。次に再生路盤材を対象とした粒度に関する検討、簡易試験方法について検討した。

4.1 溶出特性に関する検討

コンクリート解体材は、構造物の種類などに応じてコンクリートの種類(W/Cなど)や供用期間などが異なるため、溶出も異なるものと考えられることから、W/Cの異なるコンクリート、モルタル試料を破碎し、破碎後の材齢と溶出と中性化深さ、粒度の影響などの検討を行なった。また、粒度の影響については、溶出の原因となるセメントペーストがどの粒度に集中しているのかを確認するために、不溶残分試験も実施した。

(1) 試料の作製

6価クロムの溶出に関する各種特性実験に用いる試料を作るためのベースとなるコンクリートおよびモルタルは、W/C30、50、70%の3種類である。コンクリートの配合は表4-1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。モルタルは、コンクリートから粗骨材を除いた配合とした。

100×80×400mmの供試体を作製し、4週まで湿布養生した。その後、環告46号法による試験を行うために、試料をほぼ2mm以下になるように破碎し、2mmふるいを通過したものを溶出試験用の試料とした。

破碎後の試料は、室内で薄く広げて保管し、所定の材齢時に実験に用いた。

表4-1 コンクリートの配合

配合No.	粗骨材の最大寸法(mm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
1	20	4.5	70	46	165	236	856	1032	589 mL	2.4 mL
2	20	4.5	50	46	165	330	823	988	825 mL	3.3 mL
3	20	4.5	30	46	165	550	740	888	2750 mL	16.5 mL

(2) W/C、材齢と中性化の影響

1) 実験方法

コンクリート試料およびモルタル試料の破碎後の材齢に伴う6価クロムの溶出特性を把握するため、破碎直後（1日）と、8週まで2週ごとと、6カ月、1年、2年後に溶出試験を行なった。試験は環告46号法により、6価クロム濃度の測定はJIS K 0058の65.2の吸光度法によった。

試料と同じ保管場所には、中性化深さ測定用のφ50×100mm供試体も置いた。中性化深さの測定は、4、9、16週時である。また、一部のモルタル試料は、二酸化炭素濃度5%の雰囲気中で促進中性化試験を4週間行なった。中性化深さの測定は、割裂してフェノールフタレインを噴霧し、両側面5点ずつ中性化深さを測定し、その平均値を求めた。

2) 実験結果

W/Cが異なる試料について、破碎後からの材齢と溶出濃度の関係は図4-1（コンクリート）および図4-2（モルタル）のとおりである。0.05mg/Lの一点鎖線は、環境基準を示している。

コンクリート、モルタルとも溶出濃度はほぼ同じであり、材齢とともに溶出濃度は高くなっている。また、水セメント比が大きいほど溶出濃度は高くなっている。W/C 30%は概ね環境基準を下回っている。W/C 50%、70%は、破碎直後は環境基準以下であるが、それ以後は基準値を上回り、2年でも増加傾向にある。コンクリートの種類や構造物の解体から再生骨材などの製造、利用（施工）までの過程に応じて溶出濃度は大きく異なることが考えられる。

中性化深さ結果は図4-3のとおりである。室内では、W/C 30%はほとんど中性化していないが、50%は4週で0.5mm、70%で1.5mmであり、試料のほとんどは全体が中性化している可能性がある。モルタルの促進中性化試験結果は、室内のほぼ10倍であった。図4-1、図4-2の材齢に伴う溶出濃度の結果と図4-3の中性化深さ結果を見比べると、材齢に伴う溶出の増加は、中性化の影響が大きいものと考えられる。

(3) 粒径の影響

1) 実験結果

1年後には、モルタルについて粒径ごと（2-1.2mm、1.2-0.6mm、0.6-0.3mm、0.3mm-0）の溶出を、環告46号法に準じて測定した。

2) 実験結果

粒径ごとの溶出濃度結果は図4-4のとおりである。粒径が大きくなるほど溶出濃度は低下している。これ

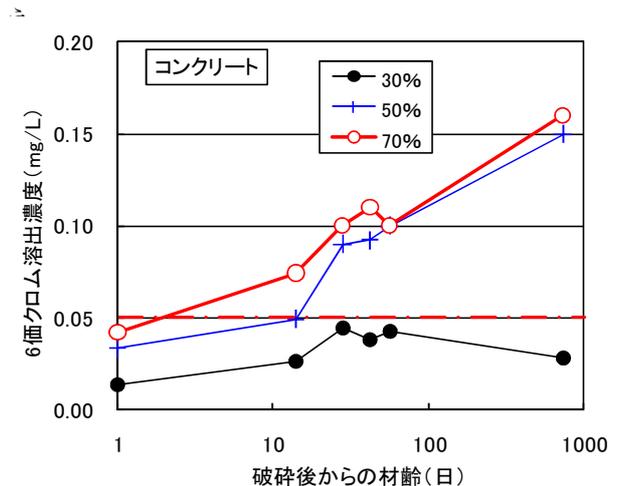


図4-1 破碎後からの材齢と溶出濃度の関係（コンクリート）

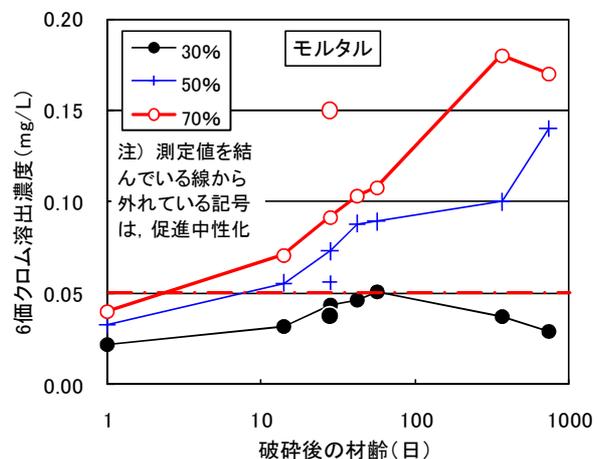


図4-2 破碎後からの材齢と溶出濃度の関係（モルタル）

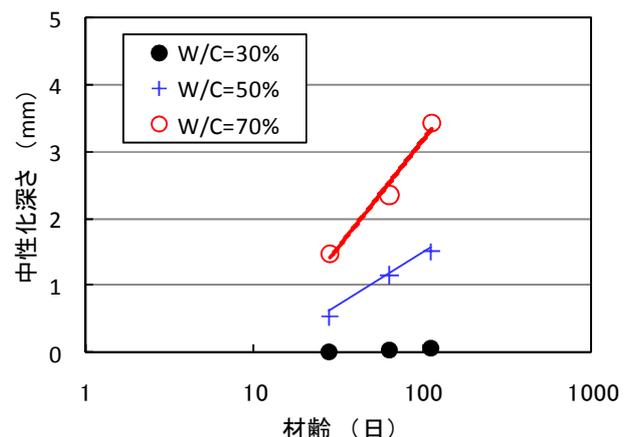


図4-3 中性化深さ試験結果

は、粒径が大きくなるほど比表面積が小さくなるためと考えられる。

(4) 不溶残分

1) 実験方法

不溶残分の試験は、試料の粒度を、破碎時の粒度分布に合わせ、0.1Nの塩酸溶液に24時間浸漬し、セメント分を溶解させた。その後、残留分のふるい分けを行い、粒径ごとの残量を測定した。

2) 実験結果

粒径ごとの溶出濃度結果は図4-5のとおりである。粒径が大きくなるほど溶出濃度は低下している。これは、粒径が大きくなるほど比表面積が小さくなるためと考えられる。

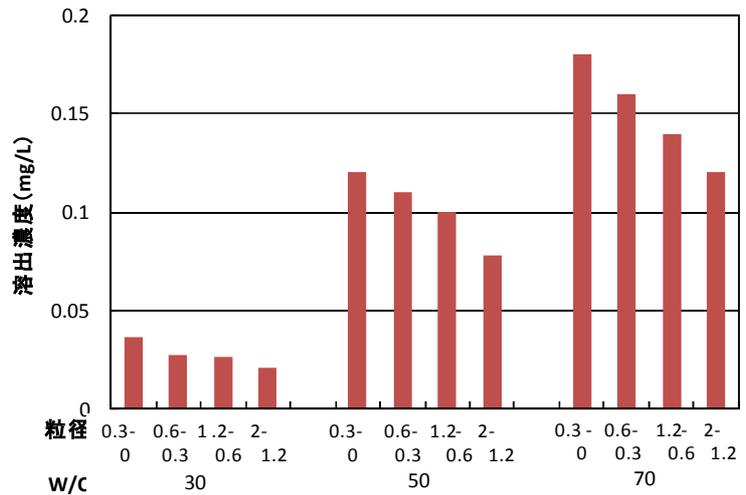


図4-4 粒径ごとの溶出濃度

4.2 再生路盤材からの溶出に及ぼす粒度の影響

再生路盤材を想定し、W/C 70%のコンクリートを20mm以下に破碎した試料を用いて、粒度を変化させた場合の溶出などについて検討した。

また、実際の使用状態に近い状態での溶出量との比較を行うため、TL法とカラム試験も実施した。

(1) 試料の作製

試料は、W/C 70%のコンクリートである。配合は表4-1のNo.1と同じである。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後、20mm以下に破碎した。ふるい分け試験を行い、粒度分布を求めた。粒度分布は図4-6のとおり、「舗装再生便覧」の望ましい標準範囲の上限である。

破碎試料は、各粒径に分級して、室内に薄く広げて保管した。所定の材齢時に、試験目的に応じて粒度調整を行い、溶出試験を行なった。

(2) 粒度・粒径の影響

1) 実験方法

破碎後4週の試料の、粒度分布が20~0mmから1~0mmまでの連続粒度と、20~10mmから0.5~0mmまでの各粒径別について溶出試験を行なった。溶出操作は、試料の粒度を除き環告46号法に準じて行い、6価クロム濃度の測定はJIS K 0058の65.2の吸光光度法による。

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4-7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。

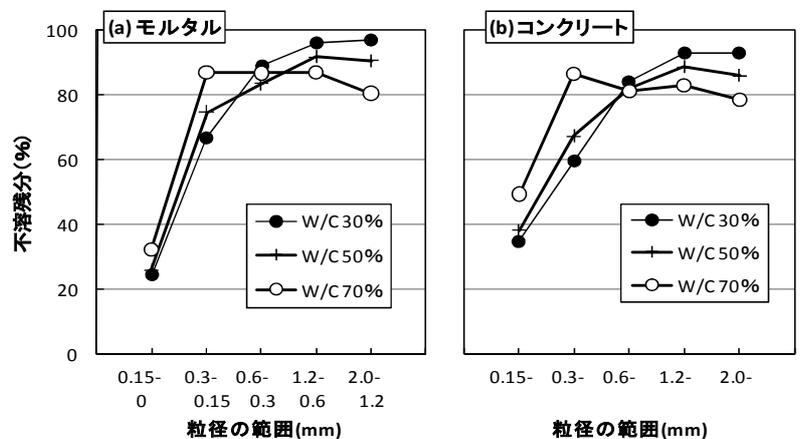


図4-5 不溶残分のふるい分け試験結果

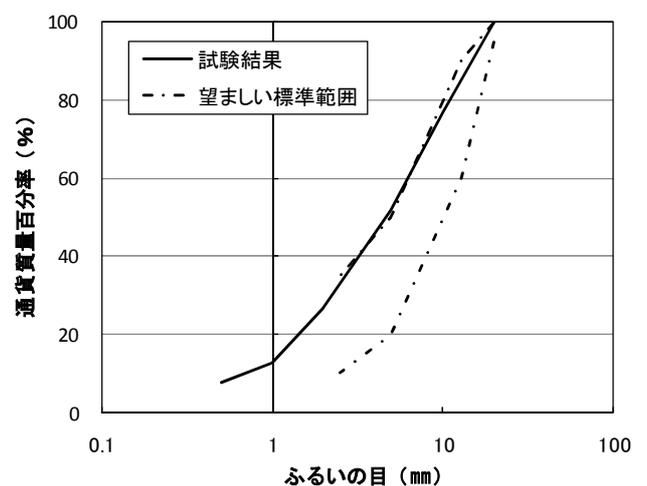


図4-6 再生路盤材の粒度分布

0.5mm以下を除いて、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、連続粒度の場合には、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。

(3) 粒度分布と各粒径からの溶出

1) 実験方法

(2)では、粒径ごとに溶出が異なること、また、粒度分布によっても溶出が異なることから、各粒径が溶出に及ぼす影響について検討した。

実験は、破碎後6箇月の試料を用い、20~0mmの連続粒度と、その粒度から0.5~0mmを除いた20~0.5mmの粒度、1~0mmを除いた20~1mmの粒度、というように順次細かい粒度を除いていき、20~10mmまでの溶出試験を行なった。同様に10~0mm、5~0mm、2~0mmについても実施した。溶出操作、濃度測定は、(2)と同じである。

2) 実験結果

溶出濃度測定結果は図4-8のとおりである。最大粒径の位置にプロットしている。

粒径ごとの溶出の影響を求めるため、図4-8の結果を、粒径範囲0.5-0、1-0.5、2-1、5-2、10-5、20-10を変数X1~X6とし、粒径ごとに溶出に影響する係数An、Bn、Cn、Dnを次の連立方程式(1)から求めた。

Ynは溶出濃度、Xnは各粒径が粒度分布に占める割合、An~Dnは溶出に影響する係数である。

20mm以下の粒度分布	$Y1 = A1 \cdot X1 + A2 \cdot X2 + \dots + A6 \cdot X6$
10mm以下の粒度分布	$Y2 = B1 \cdot X1 + B2 \cdot X2 + \dots + B5 \cdot X5$
5mm以下の粒度分布	$Y3 = C1 \cdot X1 + C2 \cdot X2 + \dots + C4 \cdot X4$
2mm以下の粒度分布	$Y4 = D1 \cdot X1 + D2 \cdot X2 + D3 \cdot X3$

計算結果は、図4-9のとおりである。

図4-9より、5mm以上の溶出はわずかであり、溶出のほとんどは5mm以下からである。

5mm以下の溶出については、粒径が細くなるほど係数が大きくなっており、溶出しやすくなっていることを示している。特に、最大粒径が大きく粒度分布が広いほど溶出に影響を及ぼす係数が大きくなっている。すなわち、同じ粒径であっても、最大粒径が大きくなり、粒度分布が広い場合、セメントペーストの占める比率が高い細粒分の分散がよくなり、全粒度に占める細粒分からの溶出の比率が高くなるものと考えられる。

この結果より、5mm以下の再生路盤材を試

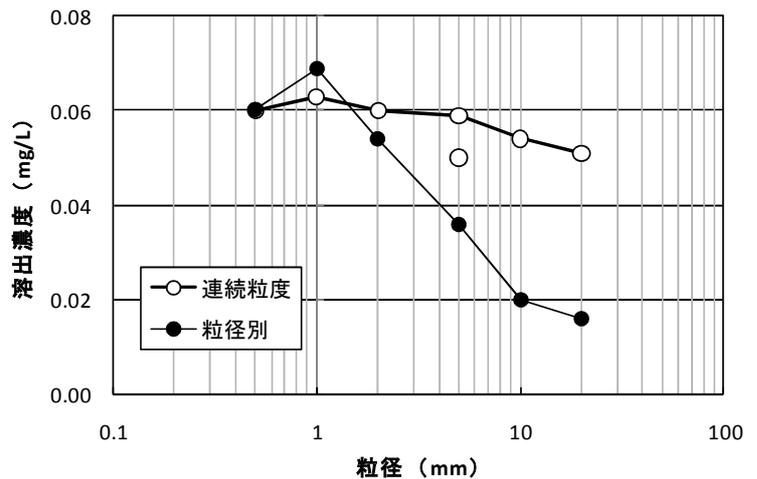


図4-7 連続粒度と粒径別の溶出試験結果

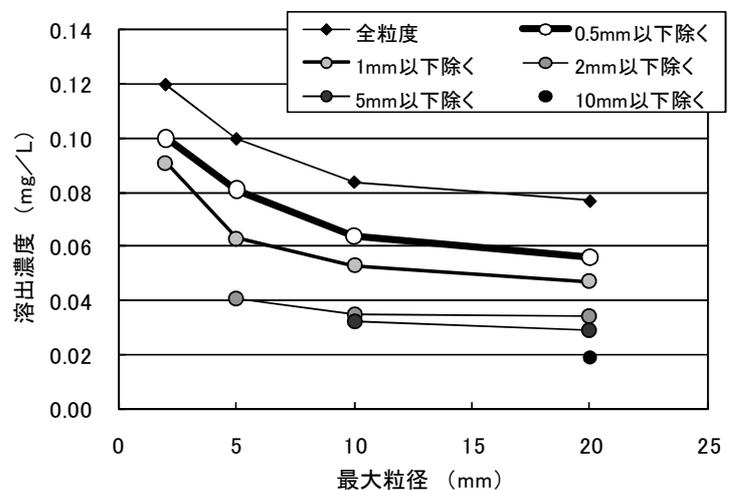


図4-8 連続粒度から細粒分を除いた場合の溶出試験結果

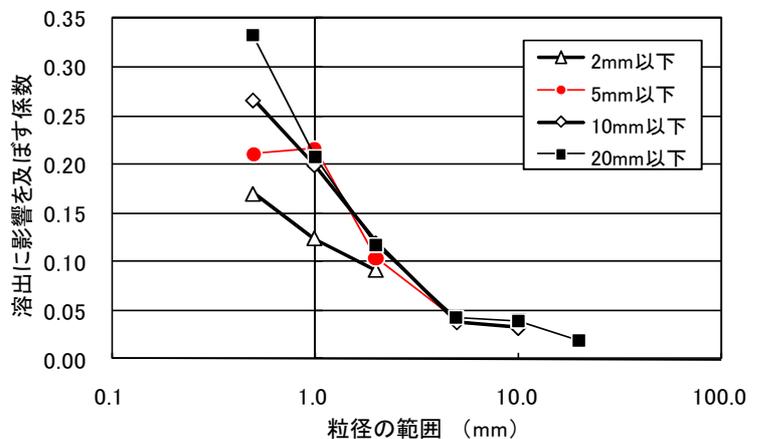


図4-9 粒径ごとの溶出に影響する係数

料として溶出試験を行うことにより、再生路盤材を代表する溶出濃度が得られる可能性が考えられる。

(4) TL 法との溶出量の比較

1) 試験方法

より実態に近い状態での溶出と、判定試験結果との関係を把握するために TL 法を行なった。試験した粒度は 2~0mm、5~0mm の 3 種類、材齢は 4 週、6 カ月、1 年である。

2) 試験結果

TL 法の試験結果は図 4-9 と 4-10 に、4 週の時の溶媒交換回数ごとの溶出濃度と、各回の溶媒交換時の溶出濃度から溶出量を算出し、累積した結果を示す。また、図 4-10 には、判定試験結果から求めた溶出量の結果も示している。

図 4-9 に粒度範囲 10-0mm と 20-0mm の結果がないのは、濃度が測定器の測定限界 (0.005mg/L) 以下であったためである。

図 4-9 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。2mm 以下の場合はそのようになっているが、5mm 以下の場合には 3 回が最大になった。

図 4-10 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。判定試験の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。

6 カ月、1 年後の結果もほぼ同様であった。

(5) カラム試験結果

1) 試験方法

カラム試験は、写真 4-1 のようにシリンダー内に路盤構成を再現し、滴下する水の量を



写真 4-1 カラム試験外観

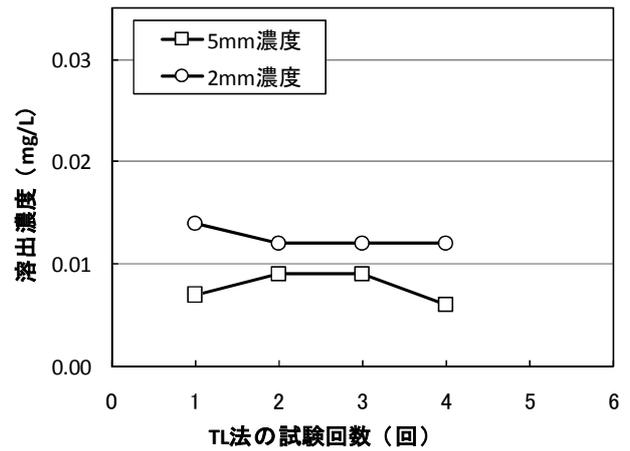


図 4-9 TL 法による溶出濃度結果

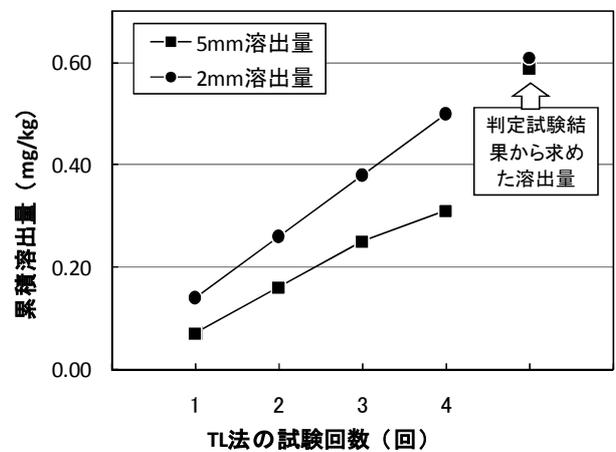


図 4-10 溶出量算出結果

調整することによって、現場に近い状態で溶出挙動を把握できる試験である。

試験は、わが国の年間降水量 1800mm/年に相当する水を滴下して行なった。シリンダーの下から降水量の 2 日分に相当する水を採取し、溶出濃度を測定した。

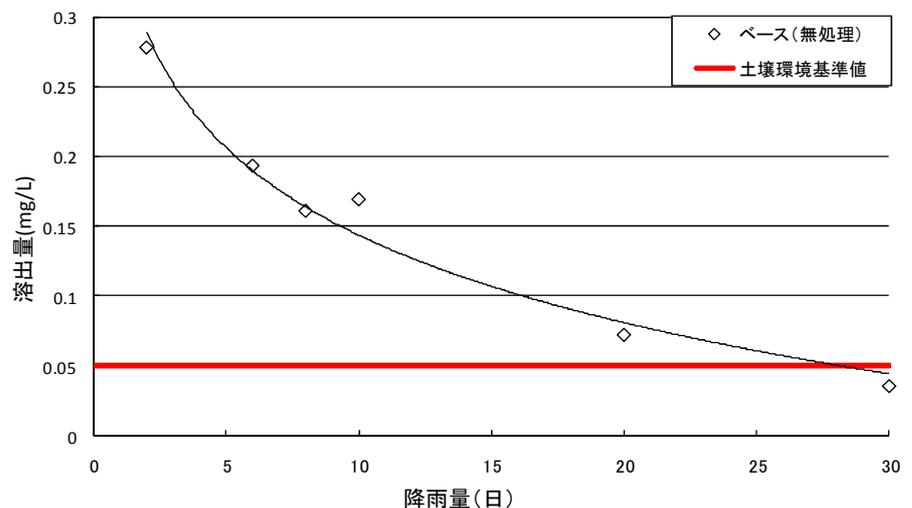


図 4-11 カラム試験結果

2) 試験結果

再生材からの6価クロム溶出量の推移は図4-11のとおりである。判定試験では0.06mg/Lの再生材を使用しているが、初期(2日)分における6価クロム溶出量は0.28mg/Lとかなり高い濃度が測定された。これは、最初に水みちがで、その周辺の6価クロムが溶出しながらかつ下したためと考えられる。その後、徐々に溶出量の濃度は低くなり、約30日分の降雨があると土壤環境基準値を下回る結果となった。実際の現場においても、施工直後には高濃度の溶出の可能性があると考えられる。判定試験結果との関係では、降雨量20日(累積降雨量1200mm)程度の時に一致している。

4.3 簡易試験の検討

(1) 簡易試験方法

簡易試験は、200mL サンプル瓶の中に、サンプル15gと純水60mLを入れて行なった。これまでの検討結果⁵⁾を参考にして検液の濃度を高くしている。試験は、1つのサンプルに対し1~3回行なった。

溶出の手順は、次のとおりである。

- 1) サンプル瓶を手で激しく上下に5分間振る。
- 2) 固液が分離するように静置する。
- 3) 上澄みをシリンジで吸引する。
- 4) シリンジの先端に孔径0.45 μ mメンブランフィルターをセットしたろ過器を取り付ける。
- 5) シリンジを押してろ過することによって、ろ液を作製する。

溶出濃度の測定は、ジフェニルカルバジド系の試薬を用い、簡易な分光光度計を利用して溶液の濃度を測定するタイプ(分析1および2)、色見本による目視(分析3)の比較的安価なものを3種類使用した。分析番号が大きくなるほど簡易な方法となっている。

(2) 実験方法

4.1と4.2で実験したものについて簡易試験も行なった。分析1~3のうち、2と3は判定に使用するには難しい結果であったことから、以下では分析1の結果を示す。

(3) 実験結果

まず4.1で用いた2mm以下の試料の簡易試験結果を図4-12に示す。斜めの線は等値線、縦と横の一点鎖線は環境基準(0.05mg/L)を示している。

分析1の結果は、図4-12のとおり環告46号法よりもわずかに大きく測定される傾向がある。

環境基準に対する判定の観点からみると、右上の第一象限は環境基準を上回っており、分析1と環告

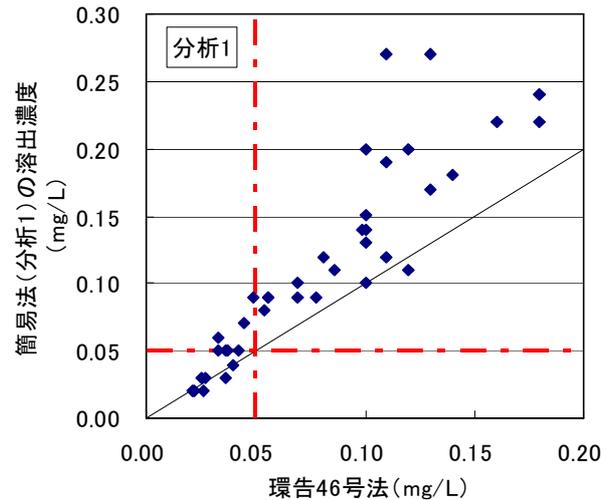


図4-12 2mm以下の試料の簡易試験結果

表4-2 簡易試験結果と環告46号の比較

環境基準(環告46号法)	0.05mg/L \geq	0.05mg/L<	
簡易試験方法	分析1	分析1	
簡易法による判定	0.05mg/L<	3	26
	0.05mg/L \geq	11	0

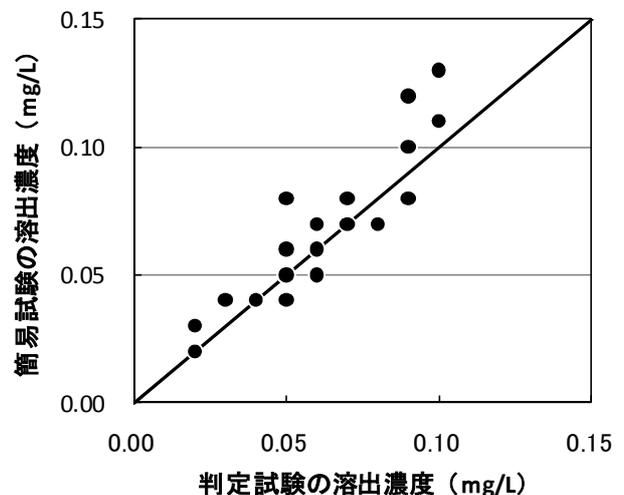


図4-13 再生路盤材(5mm以下)の簡易試験結果

46号法の結果は「不合格」で一致、左下の第三象限は「合格」で一致していることを示している。左上の第二象限は、環告46号法では合格にもかかわらず、分析1では不合格という判定となっており、「安全側の誤判定」といえる。右下の第四象限は、環告46号法では不合格にもかかわらず、分析1では合格という判定になり、「危険側の誤判定」となる。

各象限の測定数は表4-2のとおりとなっている。太線によって各象限が区切られている。第一および

第二象限の上段は0.05mg/Lを超える場合は不合格、第三および第四象限の0.05mg/L以下は合格となる測定数を示している。

分析1の測定数40に対して、環告46号法と一致して合格となる測定数は11、不合格26、安全側の誤判定3、危険側の判定0であることを示している。

以上の結果より、分析1の簡易試験は適用できる可能性が高い。

次に路盤材の5mm以下の試料の、簡易試験と判定試験の結果を図4-13に示す。図4-12の2mm以下の試料の場合と同様に、判定試験よりもわずかに大きくなる傾向があり、簡易試験は、現場での一次判定試験への適用は可能と考えられる。

5. 溶出抑制対策の検討

6価クロムの溶出を抑制する方法に、鉄鋼スラグの

硫黄S、鉄Feの還元作用を利用して、3価に還元して安定させる方法が提案されており、実用化に向けて検討した。この章では、室内における確認実験の結果を、6章では実際の舗装の路盤を想定したフィールド実験などの結果を報告する。

5.1 モルタル試料による溶出抑制実験

(1) 実験方法

還元材による溶出抑制効果を把握するため、モルタルの破碎1年後の試料を用いて、還元材を添加して溶出濃度を測定した。モルタル試料は、4.1で作製したものと同一であり、W/C 30、50、70%の3種類を、2mm以下に破碎したものである。

還元材は、高炉徐冷スラグ、転炉スラグ、塩基度の異なるA、Bの2種類の電気炉スラグの計4種類である。2mm以下に破碎したものをを用いた。その組成は表5-1

表 5-1 スラグの組成

スラグの種類	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	T.Fe	M.Fe	塩基度
高炉徐冷スラグ	41.0	34.2	14.8	7.2	0.4	0.034	0.6	0.2	1.84
転炉スラグ	46.6	12.4	4.2	5.5	2.3	1.85	17.6	1.9	4.54
電気炉スラグ A	3.5	10.4	33.5	3.9	9.4	<0.005	25.5	2.1	3.93
電気炉スラグ B	6.1	16.8	22.9	5.0	9.2	0.014	25.7	2.2	2.02

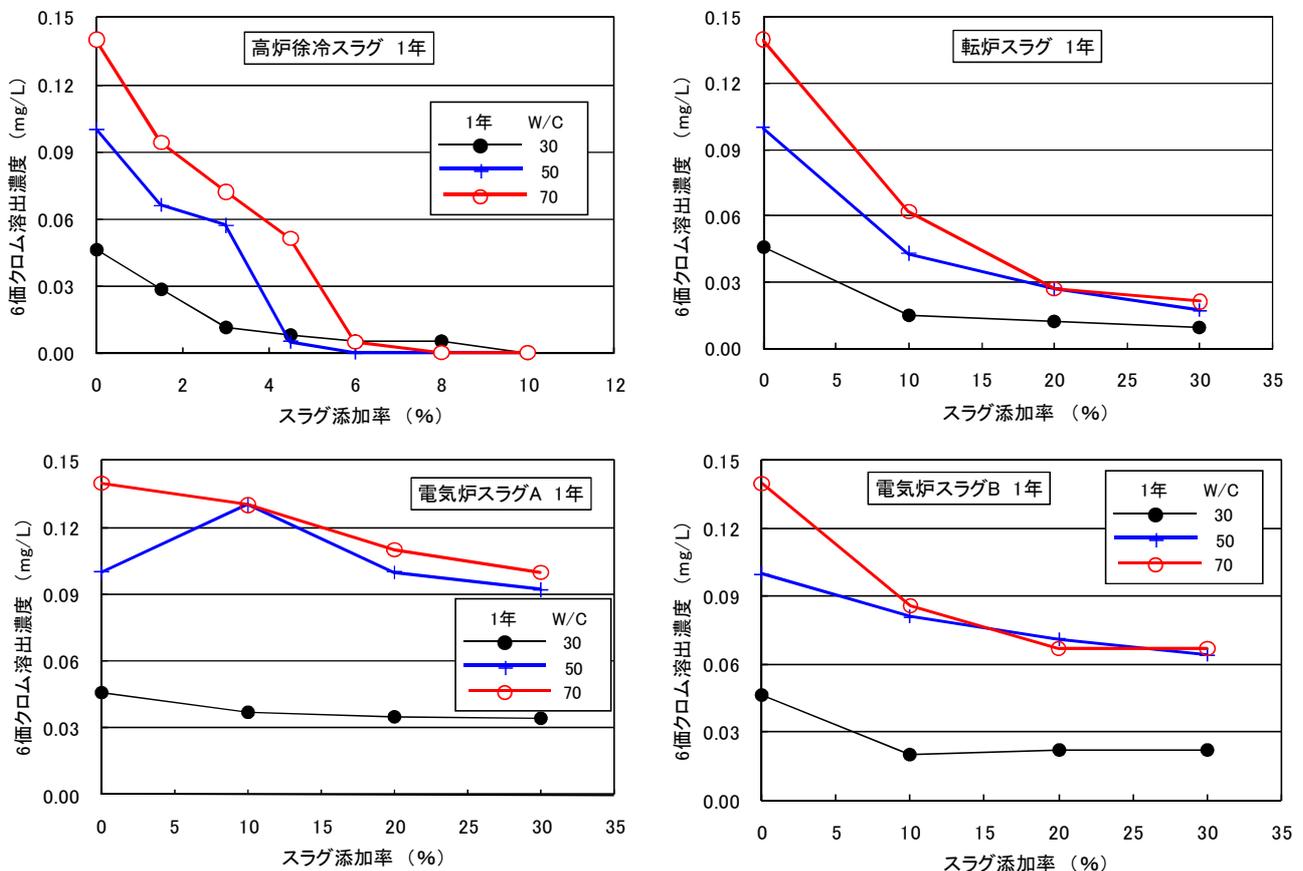


図 5-1 モルタル試料のスラグによる溶出抑制効果の確認実験

のとおりであった。還元材の添加率は、高炉徐冷スラグは試料質量の1.5、3.0、4.5、6.0、8.0、10.0%とした。転炉スラグと電気炉スラグは、10、20、30%添加した。

モルタル試料と還元材の混合は、6価クロムの還元反応を進めるために試料と還元材がほぼ表乾状態になるように、両者を所定量ビニル袋に入れ、水を徐々に加えながら激しく振った。

溶出試験は混合24時間後に、環告46号法に準じた。

(2) 実験結果

溶出試験結果は図5-1のとおりである。高炉徐冷スラグは数%の添加でほとんど溶出が抑制されている。転炉スラグは、コンクリートの種類によっては10%以上添加する必要があるが、抑制効果はある。電気炉スラグは、濃度は低下しているものの、再生材がスラグに置き換わったことによる希釈効果程度であり、抑制効果はほとんど確認できなかった。

5.2 コンクリート試料を対象とした溶出抑制実験

(1) 実験方法

コンクリート試料（再生材）の粒径を変化させ、還元材も粒径、添加率を変化させたときの溶出抑制効果の実験を行なった。

再生材は、4.1のW/C70%であり、20mm以下に破碎したものを分級して用いた。

還元材は、5.1で用いた4種類を破碎した。

再生材の粒度は、20~0mm、10~0mm、5~0mm、2~0mmの4種類である。還元材は、10~0mm、5~0mm、2~0mmの3種類である。再生材と還元材の組合せは、再生材20~0mm場合、還元材は10~0mm、5~0mm、2~0mmの3種類、同じく10~0mmの場合も、10~0mm、5~0mm、2~0mmの3種類、5~0mmの場合、5~0mm、2~0mmの2種類、2~0mmの場合、2~0mmの1種類とした。

還元材の添加率は、高炉徐冷スラグは10%まで2%ずつ増加、転炉スラグは30%まで10%ずつ増加させ、電気炉スラグは15%、30%、50%とした。

溶出試験は混合24時間後に、環告46号法に準じた。

(2) 実験結果

結果は、5.1と同じ傾向であったことから高炉徐冷スラグの場合について述べる（図5-2）。

高炉徐冷スラグの溶出抑制効果はきわめて高いことが再度確認された。再生材からの溶出濃度は0.06~0.07mg/L程度に対して、還元材を2%添加しただけで環境基準である0.05mg/Lを下回り、0.02mg/L以下になっている。

特に再生材の最大粒径が大きい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である0.005mg/L以下になった。

再生材の最大粒径と、還元材の最大粒径の関係は、

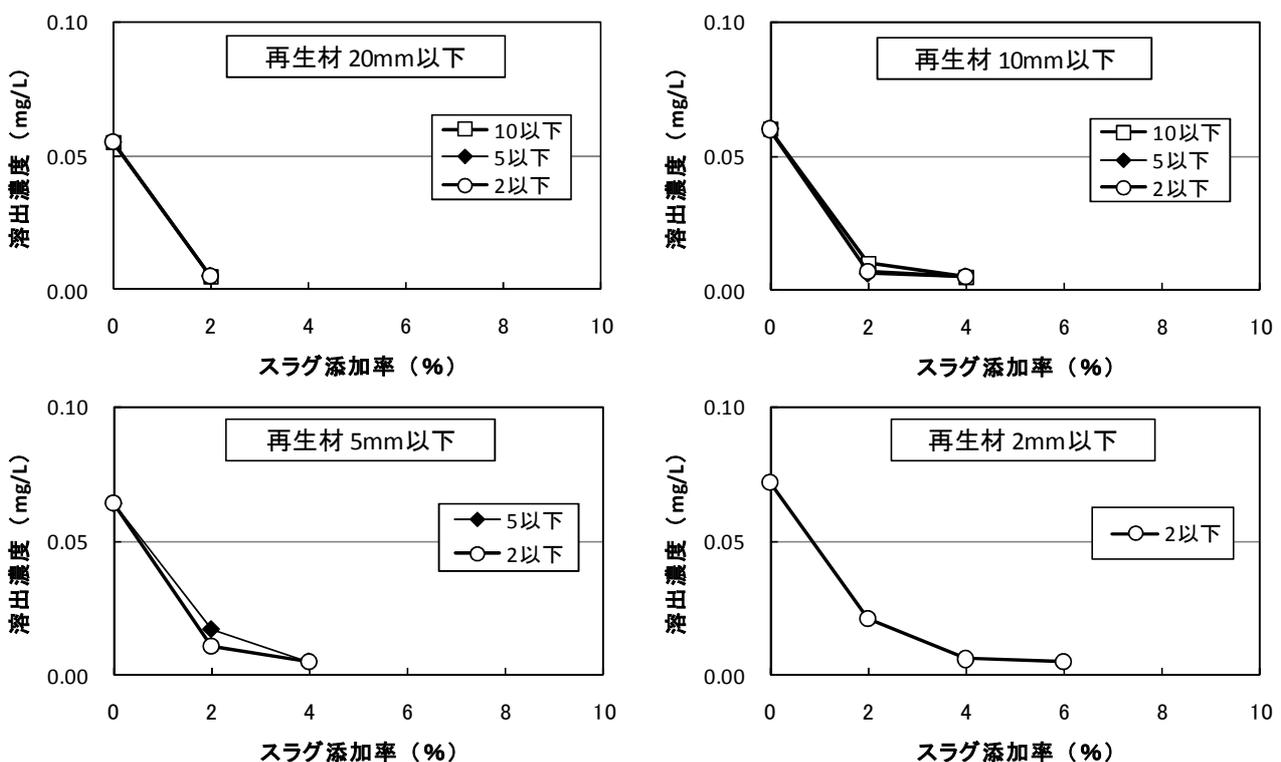


図5-2 コンクリート試料のスラグによる溶出抑制効果の確認実験

再生材の最大粒径 10mm、5mm の結果より、還元材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。

5.3 カラム試験

(1) 実験方法

4.2(5)と同様に、スラグを 5%添加した場合のカラム試験を行なった。

4.2(5)との違いは、1年の降雨量に相当する水を滴下させた後、乾燥させ、再度試験した。

(2) 実験結果

試験結果は図 5-3 のとおりである。

高炉徐冷スラグを添加した試料は、初期の段階から 6 価クロムの溶出量が大きく低下している。ただし、乾燥履歴を受けた直後はやや増加している。これは、スラグの還元力が低下し、再溶出した 6 価クロムに対応できなかったことによると考えられる。この対応策としては、スラグの粒径を大きくし、スラグに含まれるチオ硫酸の溶出を遅らせる必要がある。

転炉スラグを添加した試料は、高炉徐冷スラグに比べると抑制効果は劣るものの、6 価クロム還元材として利用の可能性は期待できる。初期段階では無処理に比べ約半分の 6 価クロム溶出量となっている。このことから、転炉スラグの添加率は、再生材に対して 10~20%程度まで増やす必要があると推察される。

6. 溶出抑制に関する確認実験

再生材からの 6 価クロム溶出の判定試験方法、溶出抑制対策の検討を行なった。それらの結果が妥当かを確認するために、実際の舗装構成に再生材を用いた場合の再生材からの溶出実験（フィールド実験）と、容器内に舗装構成を再現し、その中を流下した水への溶出の測定（ポット試験）を行なった。

6.1 使用材料

実験に用いた再生材は、一般に流通している再生路盤材（RC40）と再生埋戻し材（RC10）である。判定試験の結果

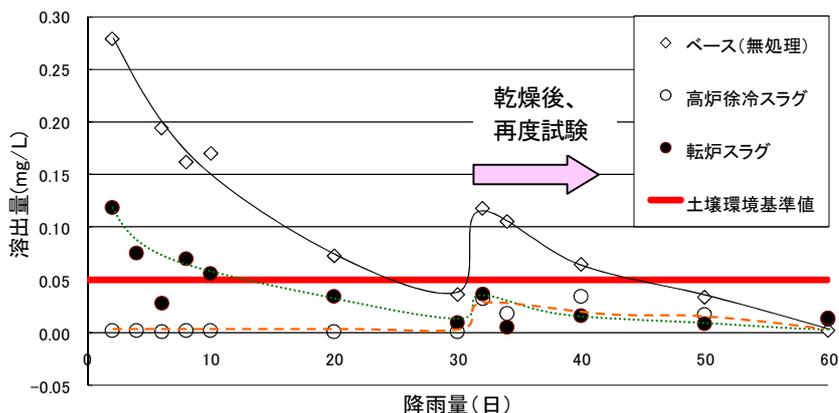


図 5-3 スラグを添加した場合のカラム試験結果

は 0.07mg/L であった。

溶出抑制のためのスラグは、高炉徐冷スラグと転炉スラグを用いた。組成は表 6-1 のとおりである。

6.2 フィールド実験

(1) 実験方法

フィールドの断面は図 6-1 のとおりであり、表層は密粒アスファルトまたは透水性アスファルト、路盤部分は再生路盤材または再生埋戻し材に、それぞれ高炉徐冷スラグを 5%添加した場合または添加しない場合の組合せとした。これらの組合せ 8 種類を図 6-2 のように工区割りして作製した。

ある程度の降雨量ごとに開削を行い、再生材からの溶出試験を行うことを計画している。

溶出試験に用いた試料の粒度は、再生路盤材、埋戻し材ともに 2~0mm、5~0mm、10~0mm とした。

(2) 実験結果

約 100mm の降雨後に 1 回目の開削をして、溶出試験した結果を図 6-3 に示す。図中の矢印は測定装置の

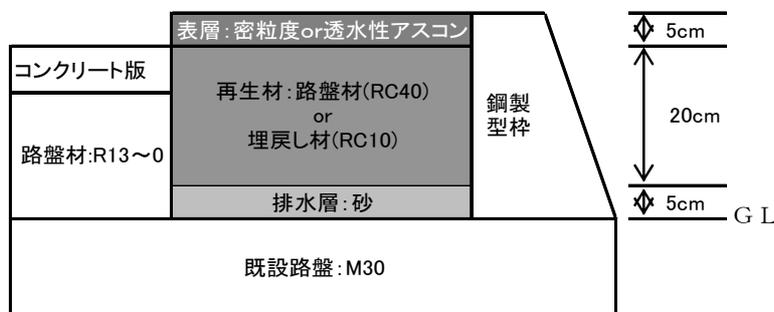


図 6-1 舗装断面

表 6-1 スラグの組成

スラグの種類	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	T.Fe	M.Fe
高炉徐冷スラグ	42.1	34.2	14.9	6.5	0.4	-	0.5	0.2
転炉スラグ	39.3	11.9	2.3	5.6	3.1	2.0	21.5	2.2

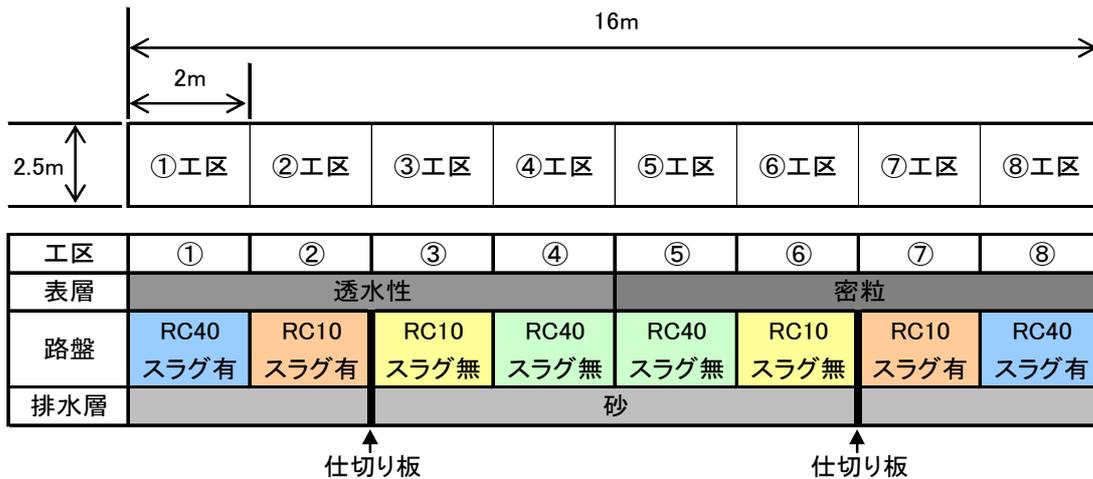


図 6-2 再生材およびスラグの表層の組合せと配置

検出限界である 0.005mg/L 以下であることを示している。いずれの結果も、原因は不明であるが、施工前の結果 (0.07mg/L) に比べ極めて低い濃度となっている。

6.3 ポット試験

(1) 実験方法

ポット試験は、図 6-4 のように直径 250mm、深さ 290mm の容器内に舗装構成を再現し、容器内を流下した降雨を採取し、再生材からの溶出試験を行う。

要因の組合せは、フィールド実験の要因に対し、高炉徐冷スラグの添加率を 3、5、7% の 3 水準、転炉スラグも加え、添加率を 10、15、20% の 3 水準とした。表層は、透水性アスファルトと表層なしとした。これらの組合せ 22 ケースの実験を行なった (表 6-2)。

水の採取は、1 回あたり降水量がほぼ 100mm で行った。開始から 3 回は連続して採取した。その後は、累積降水量 600mm 程度の時連続 2 回、800mm 程度、合計 6 回採取した。

(2) 実験結果

以下に、表層が透水性アスファルトの結果を示す。

1) 還元材を添加していない場合の結果

図 6-5 に、還元材を添加していない場合について、試験回数 (累積雨量) と濃度の関係を示す。

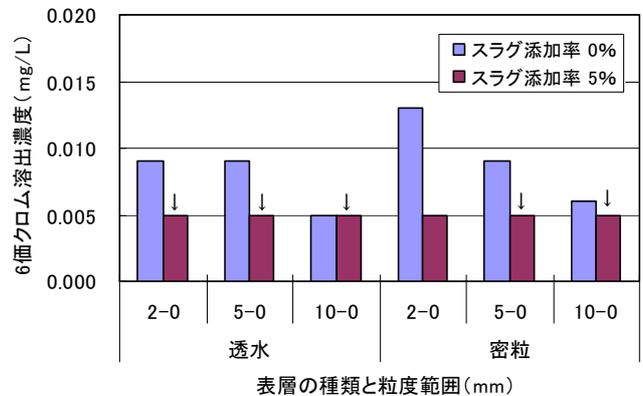


図 6-3 1 回目の開削後の溶出試験結果 (RC40)

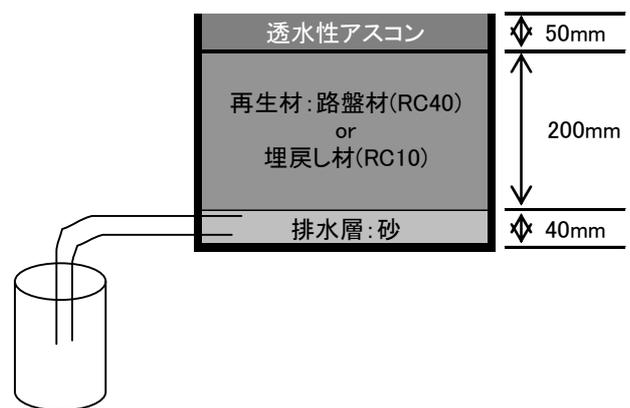


図 6-4 ポット試験の層構成

表 6-2 ポット試験の要因の組合せ

再生材		再生路盤材 (RC40)							再生埋戻し材 (RC10)						
スラグ 添加率 (%)	徐冷 転炉	0	3	5	7	10	15	20	0	3	5	7	10	15	20
	なし	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

1 回目、2 回目は、高い濃度が検出されている。これは、最初に水みちがで、その周辺から溶出ものが集中したものと考えられる。3 回目（400mm 程度）以後は 0.05～0.06mg/L 程度であり、判定試験結果（0.07mg/L）に近い値を示している。

2) 還元材の添加率

高炉徐冷スラグと転炉スラグの添加率を 3 水準変化させたときの、1 回目の溶出濃度は図 6-6 と 6-7 のとおりである。

高炉徐冷スラグは、3%以上添加することにより 0.02mg/L 程度に溶出が抑制されており、抑制効果が高いことが裏付けられた。

転炉スラグの添加率が増加すると濃度は低下しているものの、高炉徐冷スラグより抑制効果は少ない。添加率、試験回数（累積雨量）との関係を図 6-8 に示すように、添加率を増加させ、試験回数（雨量）が増えれば次第に低下している。

7. 判定試験および溶出抑制対策の提案

以上の結果より、判定試験、簡易試験および溶出抑制対策を提案した。その概要は次のとおりである。

(1) 判定試験

- 1) 分析試料の粒度について
 - a) 再生路盤材は、利用有姿を公称目開き 4.75mm のふるいでふるって通過したものを試料とする。
 - b) 再生コンクリート砂を用いた埋戻し材は、環告 46 号法に従うこととする。
- 2) 検液の作製・分析・判定基準について

分析試料の粒度以外については環告 46 号に示す方法による。

(2) 簡易試験

- 1) 簡易試験方法は還元材を含まない試料について六価クロムの溶出量の一次判定に用いることができる。
- 2) 試験方法は、文献 6) による。
ただし、試料の粒度は 3) による。
- 3) 簡易試験に用いる試料の粒度は、次による。
 - a) 再生路盤材は、利用有姿を公称目開き 4.75mm のふるいでふるって通過したものを試料とする。
 - b) 再生埋戻し材は、利用有姿を公称目開き 2mm のふるいでふるって通過したものを試料とする。

(3) 溶出抑制対策

- 1) 高炉徐冷スラグの添加率と粒度
 - a) 添加率は、2～7%程度を目安とする。
 - b) 粒度は、0～5mm、0～10mm を標準とする。
 - c) 高炉徐冷スラグは、発生から 3 カ月以内での使

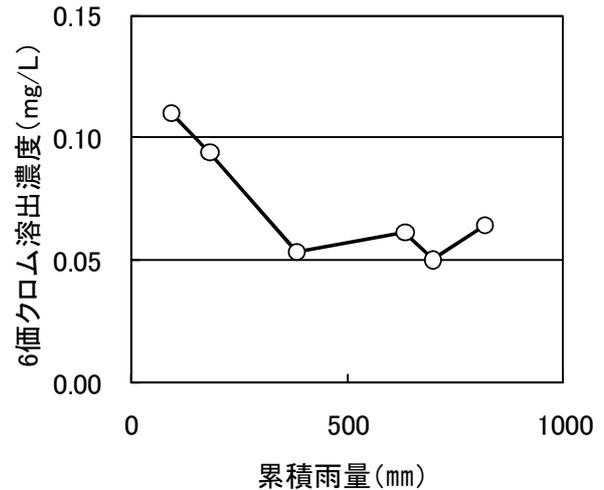


図 6-5 還元材を添加していない場合の累積雨量と溶出濃度の関係

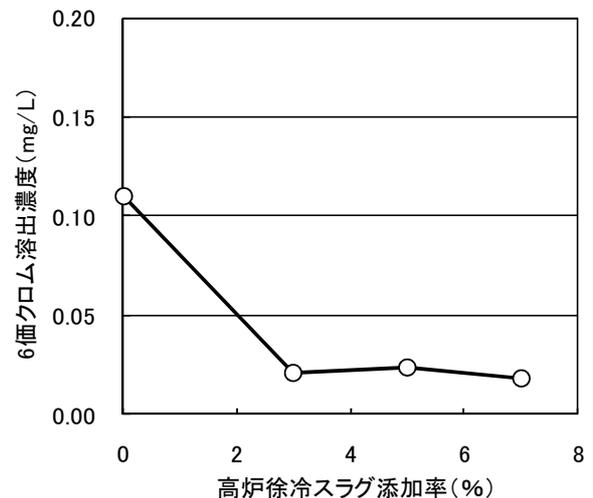


図 6-6 高炉徐冷スラグの添加率と溶出濃度の関係

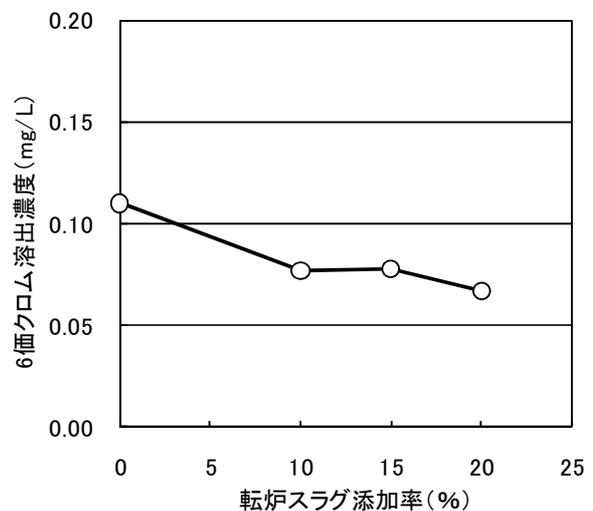


図 6-7 転炉スラグの添加率と溶出濃度の関係

用を目安とする。

2) 高炉徐冷スラグの管理

還元用の高炉徐冷スラグは、還元能力を確認した上で、使用に供する。

3) 還元材を混合したコンクリート再生材の評価

還元用高炉徐冷スラグを添加した再生材は、出荷ごと、あるいは定期的に溶出量を管理し、溶出量が十分低いことを確認する。

8. まとめ

本課題の成果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 再生材からの 6 価クロムの溶出実態および溶出の影響要因について明らかにした。
- (2) 6 価クロム溶出試験の判定試験および簡易試験の提案、また、それらの結果の評価方法を提案した。
- (3) 基準値を上回る 6 価クロムを溶出する再生材があった場合でも、安全に有効利用するための溶出抑制対策を提案した。

参考文献

- 1) 環境庁告示第 46 号、土壌の汚染に係る環境基準について、1991 (平成 3) 年 8 月 23 日
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連基準 (2010 年制定)、JSCE G575-2005 硬化コンクリートからの微量成分溶出試験方法 (案)、pp.344-347、2010.11
- 3) 環境庁告示第 13 号、産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法、1973 (昭和 48) 年 2 月 17 日
- 4) 国土交通省：公共建設工事における再生コンクリート砂の使用に係る留意事項について、国官技第 181 号、2007.10
- 5) 新田弘之ほか：セメントコンクリート再生骨材の六価クロム溶出判定の簡易方法の検討、土木学会第 64 回年次学術講演会第 V 部、pp.45-46、2009.9
- 6) (社)日本道路協会：舗装再生便覧、付録-12「参考資料：セメントコンクリート再生骨材を含む再生路盤材料からの六価クロム溶出量の簡易分析の検討事例」、pp.251-255、2010 (H22) .11

【3 年間の発表論文】

- 1) 片平博ほか：再生クラッシュランの六価クロム溶出試験、第 62 回セメント技術大会講演要旨、pp.170-171、2008.5
- 2) 新田弘之ほか：セメントコンクリート再生骨材の六価クロム溶出判定の簡易方法の検討、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集第 V 部、pp.45-46、

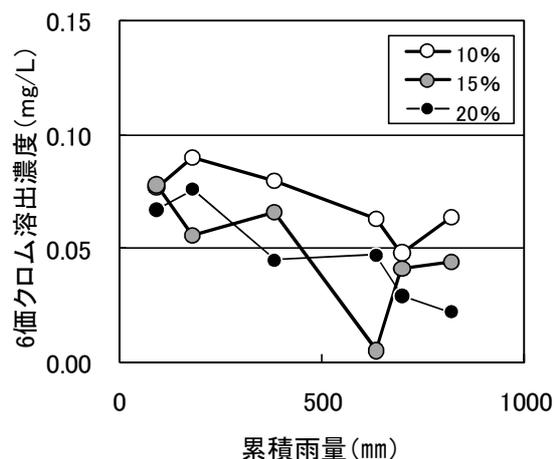


図 6-8 転炉スラグの添加率、累積雨量と溶出濃度の関係

2009.9

- 3) 森濱和正ほか：再生骨材からの溶出物質の抑制に関する研究、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集第 V 部、pp.85-86、2009.9
- 4) 森濱和正：再生骨材からの溶出物質の溶出特性および抑制に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1177-1178、2009.9
- 5) 森濱和正ほか：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
- 6) 片平博ほか：コンクリート解体材の屋外暴露における微量成分の溶出特性、第 64 回セメント技術大会講演要旨、pp.174-175、2010.5
- 7) 森濱和正ほか：再生骨材からの重金属溶出への対応、土木技術資料、Vol.52, No.6、pp.18-21、2010.6
- 8) 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、簡易試験方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
- 9) 森濱和正ほか：粒度の異なる再生骨材の 6 価クロム溶出試験に関する検討、土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集第 V 部、pp.281-282、2010.9
- 10) 共同研究報告書第 415 号 コンクリート再生材からの 6 価クロムの溶出抑制に関する共同研究報告書、2011.3
- 11) 森濱和正ほか：6 価クロムの溶出試験方法の検討 その 2 再生路盤材からの 6 価クロムの溶出、第 65 回セメント技術大会講演要旨、2011.5 (投稿中)
- 12) 森濱和正ほか：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.1、2010.7 (投稿中)
- 13) 森濱和正：再生路盤材からの 6 価クロム溶出に関する検討、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、2011.8 (投稿中)
- 14) 森濱和正ほか：ポット試験による再生材からの 6 価クロム溶出及び抑制に関する検討、土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集第 V 部、2011.9 (投稿中)

Study on Evaluation for Environmental Safety of Leaching Matter from Recycled Aggregate

Demolished concrete are utilized as recycled aggregate for crusher-run, however, leaching of hexavalent chromium from recycled aggregate is great concern from the view point of environmental safety.

The suitable test method to assess the amount of eluted hexavalent chromium from recycled aggregate has been expected for the safe utilization of demolished concrete.

For 3 years, summary of the results is as follows.

- 1) Characteristics of eluted hexavalent chromium from recycled aggregate were made clear.
- 2) Two types of test methods, where a precise method and a simplified method, were proposed to assess the amount of hexavalent chromium eluted from recycled aggregate.
- 3) A technique to mitigate the amount of elution of hexavalent chromium from recycled aggregate was proposed.

Papers:

- 1) Kazumasa MORIHAMA et al. : Study on Leaching Test Method of Hexavalent Chromium from Recycled Aggregate Part 1 Insoluble residue and Leaching of Hexavalent Chromium, The 65th Annual Meeting of JCA, pp.178- 179, 2010.9(in Japan)
- 2) Kazumasa MORIHAMA et al. : Countermeasure for Leaching Matter from Recycle Aggregate, Civil Engineers Journal, Vol.52, No.6, pp.18-21, 2010.6(in Japanese)
- 3) Kazumasa MORIHAMA et al. : Study on Leaching, Simplified Test and Control of Hexavalent Chromium from Recycled Aggregate , Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.32, No.1, pp.1505-1510, 2010.7(in Japan)
- 4) Kazumasa MORIHAMA et al. : Study on Leaching Test Method of Hexavalent Chromium from Recycled Aggregate, JSCE Annual Meeting, Vol.65, pp.281-282, 2010.9(in Japan)
- 5) Cooperative Research Report of PWRI No. 415 : Report of R&D Collaboration on Technique to Mitigate the Amount of Elution of Hexavalent Chromium from Recycled Crusher-run , 2011.3(in Japan)