

産業廃棄物中間処理に関する研究（V） —— コンクリート廃材処理施設 ——

長森 正尚 須貝 敏英 小野 雄策
渡辺 洋一 小林 進

要 旨

コンクリート廃材の処理および再利用について、県内のコンクリート廃材中間処理施設を調査した。さらに、再生コンクリートから水に溶出する成分についての分析も行った。

県内のコンクリート廃材中間処理施設の実態調査を行ったところ、コンクリート廃材はほとんどが建築物解体現場から搬入され、そのすべてが破碎処理されていた。破碎処理後の再生コンクリートは、粒径の違いで再生砕石と再生砂に分けられる。再生砕石は土木基礎資材として、再生砂は土砂として再利用されていた。

再生コンクリートの環境影響を調べるため、溶出試験および浸漬試験を行ったところ、溶出成分中に占める塩類の割合が非常に高く、特にCaの溶出量が多かった。このCaにより溶出液や浸漬溶液が強アルカリ性を示したが、一般に再生材は地盤盛土などに使用されるため、土壤溶液中の炭酸イオンや酸性土壌等により中性化する場合が多い。特に、中性化能力の大きな酸性土壌地域に用いれば環境影響が少ないものと考えられる。また、有害物質としては、 Cr^{6+} の溶出がみられた。

溶出試験では、 Cr^{6+} の溶出量の差が再生砕石と再生砂の間にはみられなかったが、浸漬試験による経時変化をみると、再生砂に関しては徐々に増加の傾向を示していた。この Cr^{6+} の溶出値を仮に「土壤の汚染に係わる環境基準」にあてはめたとすれば、この基準を超える可能性も考えられるので、環境中での動向については今後研究する必要がある。その他の有害物質は溶出されなかった。

これらの結果から、利用地域の状況を判断して、再生コンクリートを再利用すれば、環境に影響を与える可能性は少ないと考えられる。

その他、再生材の場合には、コンクリートの骨格をなすSiとAlの溶出がみられたため、骨格の風化が進み、強度が低下しているものと思われる。

1 はじめに

埼玉県においては、1960年代以降、本格的な都市化が県南部から始まり、近年では、県北部にも進展している。また、中核都市の創造が県の長期構想で提起され、現在、中枢都市圏の再整備計画が進行中など、都市の再整備が重要な課題となっている。このように都市化が進展する反面、再整備に伴って大量に発生する建設系廃棄物の処理処分問題が生じている。

平成2年3月の埼玉県産業廃棄物実態調査報告書¹⁾

によると、昭和63年度における建設業から発生する廃棄物量は、約397万tで、全産業廃棄物発生量の27.7%を占めていた。また、コンクリートやアスファルトなどの建設廃材の発生量は、約225万tで、全産業廃棄物発生量の15.7%に達し、そのうちアスファルト廃材が約145万t、コンクリート廃材が約73.5万tであった。

アスファルト廃材についてはIV報²⁾で詳述されているので、コンクリート廃材の処理・処分について注目すると、再生利用量が55.3万t（発生量の75.3%）、

最終処分量が約15.2万t（発生量の20.7%）であった。最終処分先は、県内が30%、県外が70%と、県外が圧倒的に多い。このため、再生利用率をさらに高め、県外での最終処分量を削減することが、社会的にも重要な問題として提起されている。

最終処分量を削減し、再利用を促進するためには、県内でのコンクリート廃材の実態を把握し、リサイクルシステムを確立することが必要である。

また、コンクリート廃材の再生利用率を高めるためには、再生コンクリート（以後、再生材という）の販売価格を引き下げ、安価なバージンコンクリート（以後、バージン材という）との市場競争力をつけることが必要となる。この他に、再生材はバージン材と比べると、強度も劣ると言われている。このため、利用先が限定されるなどの問題点も指摘されており、再生材の強度等の品質向上が重要な課題ともなっている。

そこで、県内のコンクリート廃材中間処理施設のうち、無作為に抽出した9カ所について、施設の稼働状況等を聞き取り調査し、その実態を把握した。また、再生材の再利用を促進するためには、環境への影響を充分に把握しておくことが必要なため、溶出試験や浸漬試験を行い、環境影響について検討した。さらに、再生材の強度の低下要因についても、溶出試験等により、若干の検討を加えた。

2 コンクリートの製造

再生材の再利用を促進するためには、バージン材の材料・主成分・製造工程などを知る必要がある。そこで、基礎資料として、バージン材の基本的な事項を以下に示す³⁾。

セメントは、土木建築物の最も重要な構造材料の一つである。このセメントに、骨材として砂を配合したものをモルタル、砂利・砂を加えたものをコンクリー

トという。コンクリートについて注目すると、全体積の60～85%は砂や砂利などの骨材で占められており、残りがセメントである。このセメントは、骨材と骨材の間隙を埋め、接着する役目を担っている。

コンクリートに用いられるセメントとしては、ポルトランドセメントが大部分を占め、全セメント生産高の約90%に及んでいる。この他に、混合セメント、アルミナセメント、超速硬セメントなどが使用されている。

したがって、これ以降は、セメントの代表であるポルトランドセメントについて記す。

ポルトランドセメントは、主として酸化カルシウム、アルミナおよびシリカの3成分からなる。その組成比はおよそ $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 7 : 1 : 2$ であり⁴⁾、この3成分でセメントの全構成成分の90%以上を占める。

ポルトランドセメントの製造は、原料工程、焼成工程、仕上げ工程の3工程に大別される。図1に製造工程の一例についてフローを示した。

原料工程は、石灰石、粘土、少量の鉄鉱滓を乾燥し、混合する工程である。

焼成工程は、混合した原料をプレヒーターにより予熱後、ロータリーキルン（数百m）に供給して約1450℃で焼成し、急冷してセメントクリンカーをつくるまでの工程である。

この焼成工程で、熱源の一部として廃タイヤを使用している事業所がある。これは、廃タイヤの処理方法として期待されている。さらに、タイヤ中のスチールからは鉄分が供給されるため、セメントの製造においても有効な方法である。

仕上げ工程は、このセメントクリンカーに約20%の石膏を加えて粉砕機で粉末にし、セメントとするまでの工程である。

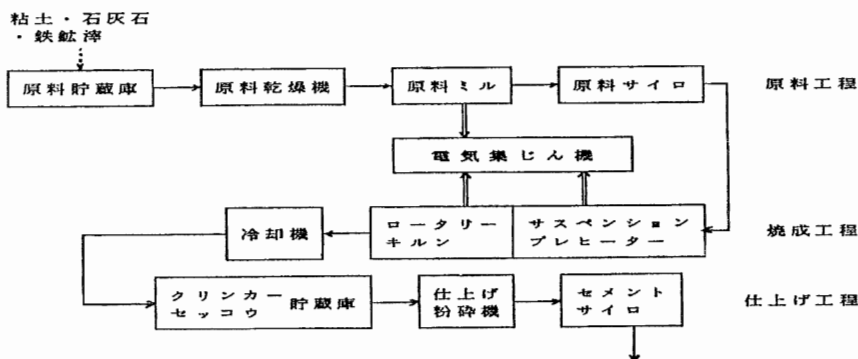


図1 ポルトランドセメントの製造工程の一例

3 コンクリート廃材中間処理施設の実態調査結果

解体現場から発生するコンクリート廃材は、以前は廃棄物最終処分場に直接搬入され、埋立処分もしくは海洋投入処分されていた。しかし、処分場の確保難から、減量化を図ることが必要となり、コンクリート廃材を破碎処理し、砂利・碎石の代替品として再利用する業者が増加してきた。

図2のように、県内には、現在47カ所のコンクリート廃材中間処理施設が稼働しており、それらの施設に搬入された廃材は全て破碎処理され、再利用されている。



図2 コンクリート廃材処理施設設置位置

表1 コンクリート廃材の受入れ状況実態調査結果概要

処理施設	受入量 (t/年)	季節 変動	受入先 (%)	混入物	受入保管		再生材 保管容量
					実際の保管量 と保管状況	保管容量	
A施設	96,000	秋冬多 春夏少	県内 100		500-5,000 t (360-3,650 m ³) 屋外・未舗装	3,200 m ³	1,320 m ³
B施設	75,000	無	県南部 1 県北部 80 県西部 13 県東部 2 群馬県 4	金属	屋外・未舗装	1,200 m ³ *	
C施設	60,000	冬期多 春期少	県南部 100	金属、鋳物砂 プラスチック	50-3,800 t (40-2,770 m ³) 屋外・未舗装	2,000 m ³ *	
D施設	15,000	冬期少	県内 100	木、瓦、金属	150-160 t (110-120 m ³) 屋外・舗装	805 m ³	810 m ³
E施設	不明	冬期多	県内 80 県外 20	木	500-600 m ³ 屋外・未舗装	810 m ³	500 m ³
F施設	840	無	県内 東京都 千葉県 茨城県	プラスチック、木	50-100 t (40-70 m ³) 屋外・舗装	2,000 m ³	3,000 m ³
G施設	8,800	無	県内 100	コンクリート電柱の み受入	100-200本 屋外・未舗装	956 m ³ *	
H施設	60,000	秋冬多 夏期少	県内 70 東京都 24	アスファルト (コンクリートの約 2/5)	500-1,000 t (360-730 m ³) 屋外・未舗装	320 m ³	6,600 m ³
I施設	45,000	冬期多 夏期少	県内 93 東京都 7	アスファルト (コンクリートの約 1/2) 木、金属	3,000-5,000 t (2,190- 3,650 m ³) 屋外・未舗装	6,000 m ³	2,400 m ³
平均	(A+B+C+D+H +I)/6 =58,500t/年		県内93.1% 県外 6.9%				

注1) 受入保管の欄の実際の保管量の単位が t での回答が多く、保管容量と比較するため m³ に変換した。コンクリート廃材の見かけ比重 1.37 t/m³ を使用したが、これは「公害と対策 Vol.12 No.3 21-28」の建設廃材土砂の値より計算した値である。

2) 保管容量で * 印のついたものは、廃材と再生材の保管場所を分けていなかった。

コンクリート廃材の受入状況から処理・再利用までの実態を、県内9カ所の施設について、アンケート並びに聞き取りにより調査した。

3・1 コンクリート廃材の受入状況

表1に、受入状況の概要を示す。

施設により、受入量には840～96,000 t/年とかなりの差がある。平成3年に稼働して間もないF施設や電柱のみを扱っているG施設の受入量を除くと、15,000～96,000 t/年となり、平均では58,500 t/年であった。平均値を大幅に下回っている施設はD施設で、15,000 t/年であった。これは、ビル等の大型解体現場よりも、一般住宅の解体現場からの受入量が多いためである。

さらに、受入れの季節変動についてみると、D施設は、他の施設と異なり、一般住宅の建て換えが少ない冬期に減少する傾向にあった。稼働開始して間もないF施設や電柱のみを取扱っているG施設では、受入量の季節変動がみられなかった。処理施設の比較的少ない県北に位置しているB施設では、処理能力以上の解体現場が近隣にあるので、混入物の少ないコンクリート廃材を選択できるとともに、受入量を調整できるので、年間を通じて季節変動が少なかった。その他の施設の場合は、解体現場の多い県南部に立地しているため、受入れが偏っており、工事の多い冬期に受入量が多くなっている。その他にも、景気の変動に大きく左右されるという傾向がみられた。

受入先については、処理能力の小さいE・F・G施設を除く6施設のデータによると、県内からの受入れが93.1%、東京都など近県からの受入れが6.9%であった。コンクリート廃材の中間処理経費をみると、物理的な粒状化処理が主流であるため、他の廃棄物に比べて中間処理経費は低く、運搬費にかかる割合が高くなっている。そのため、受入先が事業所周辺に偏っているものと考えられる。このように、コンクリート廃材の受入れは、埼玉県内からの搬入がほとんどであり、特に事業所周辺にある解体現場からのものがほとんどであった。

受入れたコンクリート廃材の保管施設は、屋外にあり、ほとんどが未舗装であった。その受入保管量は、40～3,650 m³と、施設による差が大きかった。他方、保管施設の容量も320～6,000 m³と、かなり異なり、受入量に比例した容量を備えているとはいえない場合があった。また、一時的にはあるが、保管能力を超え

て保管している施設が3事業所あった。

コンクリート廃材を処理し、製品化した再生材の保管容量は500～6,600 m³であり、コンクリート廃材と再生材の保管施設を分けていない事業所が3カ所あった。

解体現場から搬入されたコンクリート廃材には、木くず、金属くず、土砂などの夾雑物が混入している。このため、同じ建設廃材でも、夾雑物の少ないアスファルトに比べ、再生処理が困難となっている。したがって、夾雑物の多いコンクリート廃材を再利用するためには、木くずや金属くずなどを選別しなければならない。この目的で、金属くずは磁選機により、他の混入物は人手により選別される場合がほとんどであった。鉄筋密度の非常に高い二次製品については、破碎処理の際に、コンクリートと鉄筋を分別することが労力や経費の増大となるため、受入れを行っていない事業所もあった。

3・2 コンクリート廃材の再生処理工程

再生材は、路盤材・埋戻し材などに再利用されている。再利用を前提としたコンクリート廃材の破碎工程の代表例を図3に示す。

排出現場で概ね30～50cm以下に小割りされたコンクリート廃材は、処理施設敷地内に搬入され、鉄筋や木材など大きな異物を排除した後、一次破碎される。一次破碎では、ジョークラッシャ（圧縮破碎機）を用いて、5～10cm程度に粗碎する。次いで、鉄筋の混入による破碎機の故障を避けるため、磁選機による金属くずの除去を行う。また、再生材の製品価値を落とさないために、手選別による木くず・布・廃プラの除去も行う。二次破碎では、インパクトクラッシャ（衝撃破碎機）を用い、40mm以下に細碎して粒径を整える。

圧縮力を利用した、ジョークラッシャなどの破碎だけでは、偏平な粒子が生じやすく、また粒度分布にも問題が多い。そこで、インパクトクラッシャなどによる、衝撃力を利用した破碎を行い、粒形や粒度分布を改善する。このように、二段階破碎を行っている施設がほとんどであった。その後、ふるい分けをして粒径を整え、再生碎石（標準は50～5mm）と再生砂（標準は10～0.1mm）に分ける。

なお、処理が困難な二次製品処理の一例として、廃電柱を専ら処理している施設があった。廃電柱の処理方法は、バクラを使って電柱を挟んで砕き、鉄筋とコンクリートに分けるものである。

聞き取り調査を行った各処理施設の概要を表2に示

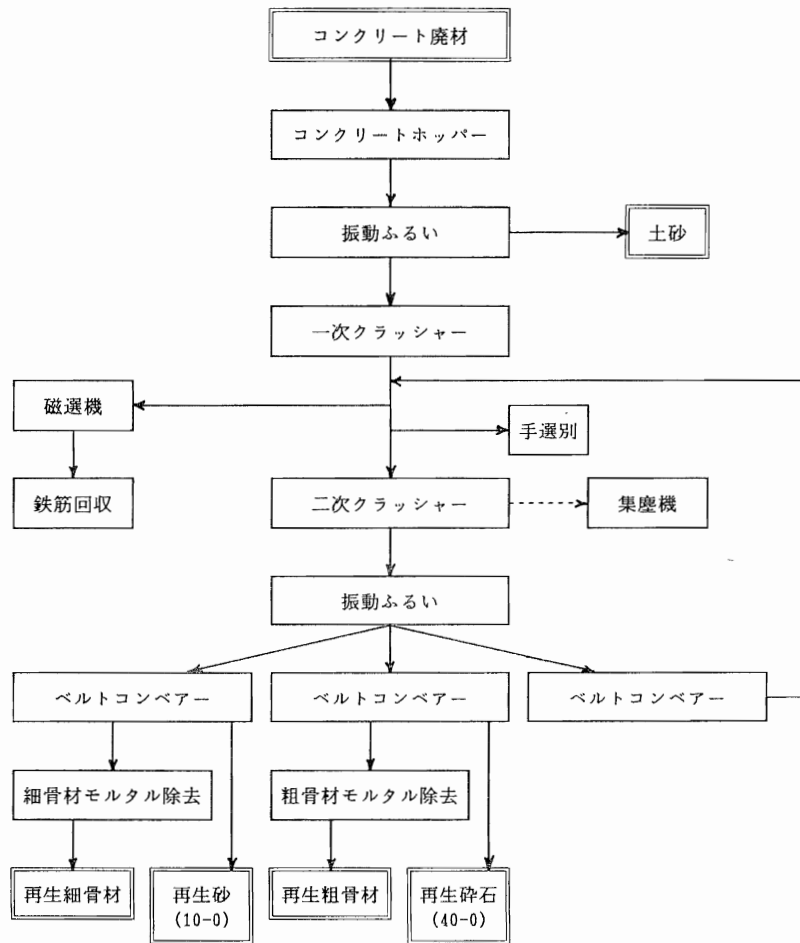


図3 コンクリート廃材中間処理工程の一例

す。ほとんどの事業所が、ジョークラッシャーとインパクトクラッシャーの両方を持ち、手選別と磁選機による選別を行っていた。

受入量と処理能力の関係をみると、受入量が不明なE施設と廃電柱だけを限定処理しているG施設を除いた、7施設における年間最大処理可能量は、処理能力と年間稼働時間から算出すると114万tであった。しかし、受入量は35万tと処理可能量の約3割に留まっている。手選別などが律速段階と考えられるが、それを考慮に入れても稼働率は低いと思われる。したがって、再生材販売コストの低廉化を図るためには、さらに稼働率を上げる必要がある。また、受入量の季節変動が大きいため、年間を通じての処理量の平均化も検討する必要があると思われる。

処理された再生材は山積みされており、それが崩れ

ると、作業や通行人に危険を生じさせる場合がある。このために、保管場所には必ず防護壁が設けられていた。さらに、ほとんどの処理施設では、工場、山林、田畑、空き地等の民家の少ない地域に立地されているものの、騒音・振動等を防止するため、破砕機などの施設を屋内に設置している場合が多かった。粉塵対策として、集塵機や散水設備を設置している事業所もあった。

3・3 再生材の使用状況

埼玉県内では、再生材は、埋戻し用砂質土、盛土、切込砕石（路盤用材など）、裏込用砕石などとして用いられている。

埋戻し用砂質土、盛土などの土地造成材料は単なる土砂である。このため、特に定められた規格はなく、

表2 コンクリート廃材処理施設の実態調査結果概要

処理施設	処理能力 (t/hr)	年間稼働時間	処理設備	前処理設備
A施設	40	2,400	ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機
B施設	65	1,250	パワ ジョークラッシュ	磁選機
C施設	35	2,030	ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機 手選別
D施設	70	2,400	ジョークラッシュ	磁選機
E施設	40	800	ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機 手選別
F施設	80	2,500	ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機 風選機 手選別
G施設	(4)	3,000	パワ	
H施設	120	2,400	パワ ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機 手選別
I施設	100	2,400	ジョークラッシュ インパクトクラッシュ	磁選機 手選別

中間処理施設で破碎された再生砂を、土地造成材料として使用するには十分である。特に、近年は山砂が不足しており、粒径の小さい再生砂の需要が多くなっている。

表3に、再生材の利用法を選択する際の目安⁵⁾を示した。県内で中間処理されてできる再生砕石の場合は、表中の粗割材にあたるため、コンクリート用骨材として利用することは不可能となっている。これまでに、(財)建築業協会の委員会⁶⁾などで実施された研究の結果では、再生砕石は、コンクリート用骨材のJIS規格⁷⁾

(ふるい分け、すりへり、単位容積質量及び実績率、比重吸水率、洗い、有機不純物、軟石量、物理試験)には適合していないとされている。そこで、再生砕石については、低強度のコンクリート材として使用する場合には限るか、あるいは、バージンの骨材に少量混ぜて使うことが提案されている。しかし、混合して使用する場合は、作業性が悪く、強度のばらつきがある。このため、全国的にもあまり使われていないのが現状である。

表4に、コンクリート廃材の排出元と再生材の利用先について示す。公共工事と民間工事からのコンクリート廃材の排出比率は、データが不十分であるE・F施設を除いた排出量から計算すると、38対62で、民間工事からの受入れが多かった。再生材の利用先は、不明確なA・E施設を除くと、公共工事41%に対し、民間工事が59%で、受入先と同じく、民間工事の方が多かった。

日本土木工業協会と日本電力建設業協会の環境委員会⁸⁾が行った、再生砕石や再生砂の利用に関する全国調査の結果によると、全再生材のうち、路盤材としては約40%が利用されている。それに反して、埼玉県での公共工事では、再生砕石が路盤用切込砕石として利用されたケースはこれまでにない。平成3年度の、県内における各種公共工事で利用された再生切込砕石(路盤用以外)の全量は138,416m³であった。路盤用以外とは、一般に事業系といわれ、下打ちの基礎や擁壁の基礎などとして利用されているものである。

再利用の促進という観点から、再生砕石を公共工事の路盤用切込砕石として利用するには、土木材料規格試験⁹⁾に合格しなければならないが、再生砕石は、こ

表3 再生コンクリートの利用法選択の目安⁵⁾

コンクリート再生材の分類		使用の目安 障害等	用 途					摘 要		
			地盤処理	盛土 裏込め	路盤	鉄筋コン クリート	無筋コン クリート	鉄筋コン クリート	他の指針等	総合技術開発 70%以上の成果
粗割材		安価、粗大はらつき大	△	△	○	×	×	×	舗装要綱	
再生骨材	粗骨材	高度処理 高 価	※	※	※	○	※	○	土木学会コン クリート 標準示方書	再生骨材コ ンクリート の設計施工 指針(案)
	低処理 モルタル付着が多い	△	○	※	△	○				
細骨材		混入物	○	○	△	△	○	△	JIS	
処理塵材(微粉末)		アルカリ性	○	△	×	×	×	×	道路土木指 針	深層混合処 理への利用

○：利用可能なもの
△：条件付きで利用可能なもの
※：利用には十分であるが、不経済であるもの
×：利用不可

注) 建築では、普通骨材との混合利用を前提としてコンクリートの品質を低下させない程度の混入率の範囲で、主に再生粗骨材を利用することを目標としている。土木では、再生骨材を単独で使用することを前提とし、構造物を限定して用いることを目標としている。

表4 コンクリート廃材の排出元と再生材の利用先

処理施設	廃材排出元		再生材利用 公共：民間	粒径、販売単価 (mm, 円/t)	
	公共	民間		受入単価 (円/t)	
A施設	50 : 50		不明	40-0 10-0	1,250 1,500
B施設	30 : 70		8 : 92	40-0 7-0	800 800
C施設	30 : 70		100 : 0	40-0 13-0	930 1,060
D施設	0 : 100		不明	0 : 100	
E施設	20 : 80		5 : 95	40-0 5-0	1,060 1,175
F施設	不明		0 : 100	40-0 7-0	1,000 1,300
G施設	0 : 100		(7,400)	0 : 100	
H施設	70 : 30		73 : 27	40-0 5-0	700 1,300
I施設	15 : 85		1,000~	40-0 10-0	
平均	38 : 62 E・F除く		41 : 59 A・E除く		

の規格強度を満足しない。このために、埼玉県では他の用途にしか使用されていない。この理由としては、複数の現場から搬入されることによる品質の偏りや品質管理の難しさが最大の原因であると言われている。埼玉県では、現段階で、再生砕石の利用については大きな問題となっていないが、公共工事への使用を推進する必要がある。

再生砕石が規格から外れる理由の一つとして、本田ら¹⁰⁾は、骨材に付着したセメント水和物の比重が小さく、吸水率が高く、またすりへり減量が大きいことを挙げている。そのために、高度処理として、再生砕石どうしをぶつけ、表面に付着したセメント水和物を除去し、強度を上げている例も他県にはあった。

しかし、埼玉県内のコンクリート廃材中間処理施設では、高度処理を施していないため、公共工事に再生砕石を路盤材や骨材として再利用できない。

他方、セメント材料化学の立場からみると、「その強度は骨材の充填状態や形状などの影響を受けるが、本質的には、セメントペースト（セメントを骨材なしで水で練ったもの）の強さおよびペーストと骨材の付着力に依存する。¹¹⁾」と言われている。再生材のあり方として、骨材の強度を低下させずに処理する方が良

いか、それともセメントの付着率を上げて強度を補う方が良いのかといった点で、今後、再利用を促進するためには、骨材とセメントの両面からみた研究が必要であろう。

4 再生材による環境への影響

実態調査の結果、再生材のほとんどは、切込砕石や埋戻し用砂質土などの土木用基礎資材として利用されていた。これは、破砕処理された再生材の強度が低いことから、骨材として利用されないためである。

再生材を土木用基礎資材として再利用した場合、雨水や土壌水などにより、表面のセメント部分から主成分のCaが、また、セメントや骨材の風化が進むにつれて、Si, Al, Feなどが溶け出すことが考えられる。

そこで、環境への影響を調べるため、溶出試験および浸漬試験を行い、セメントや骨材からの水への溶出成分について検討を行った。また、有害物質の溶出傾向についても調べた。

4・1 再生材の溶出試験

再生材からの溶出成分を把握し、それを使用した場合の環境に与える影響を検討した。また、粒径等による溶出傾向の違いについても調べた。

4・1・1 実験方法

実態調査を行ったA・C・F・Iの処理施設と、他に再生材を製造しているJ社を加えた5社から試料を採取した。試料には、再生砕石と再生砂の2種類を用いた。これらについて溶出試験を行い、有害金属や塩類等を分析した。基本的な溶出操作は、環境庁告示第13号に準拠し、分析方法はJIS-K0102（工場排水試験方法）に準じた。すなわち、再生材1（重量）に対して水10（容量）の割合で混合し、6時間振とう後、濾過したろ液について分析した。

4・1・2 溶出試験結果および考察

表5に溶出試験結果を示した。

再生砕石と再生砂の溶出液pH値はいずれも12前後で、大きな差はみられなかったが、再生砕石よりは再生砂の方が幾分高い値を示した。これは、再生砕石に比べて再生砂の方が表面積が大きいため、アルカリ成分がより多く溶出したためである。このアルカリ成分としては、多量に溶出しているCaが考えられる。

表5 再生砕石および再生砂の溶出試験結果

試料	再生砕石					再生砂				
	40~10	40~13	40~8	40~10	40~5	10~0	13~0	8~0	10~0	5~0
事業所名	A社	C社	F社	I社	J社	A社	C社	F社	I社	J社
pH	11.8	11.8	11.8	11.8	11.6	12.1	12.0	11.7	12.0	12.0
EC	1.4	1.4	1.4	1.7	1.5	2.8	1.8	1.2	2.3	2.3
Na	17	6.0	26	14	11	31	17	25	31	26
K	9.1	5.5	16	17	11	14	10	14	47	14
Ca	120	120	96	150	210	230	150	120	210	210
Mg	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cr ⁶⁺	0.07	0.03	0.07	0.02	0.08	0.06	0.04	0.08	0.04	0.07
As	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Pb	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Cu	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01
Zn	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01
Ni	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Fe	0.04	0.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.01
Mn	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
COD	2.8	0.8	3.2	2.9	1.9	2.3	2.7	5.0	7.4	4.2

注) pH, EC (mS/cm) 以外の単位はmg/l

電気伝導度 (EC) も、一般に再生砕石に比べて、再生砂の方が高かった。これも、多量に溶出しているCaのためである。

K, Na, Ca, Mgなどの塩類について比較すると、圧倒的にセメントの主成分であるCaの溶出量が多く、次いでNa, Kで、Mgはほとんど溶出しなかった。また、再生砕石と再生砂の塩類濃度を比べると、再生砂の方が高い値を示した。これは、表面積の違いや風化の違いによるところが大きいと考えられる。

「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に定める有害物質の中では、Cr⁶⁺が、平均0.06ppmと多少高い値を示した。この理由として、粘土中に含まれるCrがセメントの焼成工程で酸化されてCr⁶⁺となり、これが溶出したためと考えられる。Cr⁶⁺の溶出傾向としては、粒径の違いはあまり見られず、事業所間の差が出ていたことから、搬入された廃材によって異なる可能性が高いと考えられる。また、As, Cd, Pbは溶出しなかった。

その他の金属類については、Zn, Ni, Mnは検出されず、AとF施設ではCuの、A・C・F施設ではFeの溶出がわずかにみられた。

有機汚濁指標であるCODは小さいため、環境に対しては、pHとCr⁶⁺について注意を払う必要があるものと考えられる。

4・2 バージン材および再生材の浸漬試験

溶出試験により、多量のCaが溶出するためにpHが上昇し、さらには、Cr⁶⁺の溶出が観察された。

そこで、これらの物質が時間の経過につれて、溶出濃度に変化を生ずるかどうかを検討するため、再生砕石や再生砂を各種の溶液に浸漬し、塩類や金属類などの溶出成分の経時変化を追跡調査した。

4・2・1 試料の調整

溶出試験で用いた、5社分の再生砕石を等量混合して1検体とした。また、再生砂についても同様に5社

分を1検体とした。さらに、バージン材と再生材を比較するため、表6に組成を示したバージン材を固形化せずに粉体のまま使用した。

表6 バージン材の組織

セメント	天然砂 (骨材)	高分子化学糊
24.4%	73.2%	2.4%

商品名：ホームコン
販売：鹿島コンクリートドライモルタル事業部

4・2・2 浸漬溶液の調整

浸漬溶液としては、酸性、中性、アルカリ性の3種類の溶液を調整した。浸漬溶液の調製方法について以下に示す。

① 酸性溶液

降雨時の影響をみるため、埼玉県の前5年間（昭和62年～平成2年）の全降雨のpH値^{1,2)}を調べたところ、平均がpH4.5の酸性雨であった。また、この酸性雨の化学成分の平均値及び最高・最低値は表7のとおりである。

表7 埼玉県の過去5年間における降雨濃度と浸漬溶液（酸性）条件

	5年間の平均	最高値	最低値	浸漬溶液条件
pH	4.5	4.56	4.37	3.9
Cl ⁻	1.18	1.38	1.11	1.8
NO ₃ ⁻	1.73	2.00	1.47	2.4
SO ₄ ²⁻	2.19	2.34	2.09	3.0

注) pH以外の単位はmg/l

そこで、過去5年間の雨水の濃度を考慮し、市販の精製水（日本薬局方 pH=6.0）に塩酸、硝酸、硫酸（すべて和光純薬工業、有害金属測定用）を添加して、表7の条件でpH3.9に調整したものを酸性溶液とした。

② アルカリ性溶液

N/10水酸化ナトリウム（和光純薬工業、容量分析用）に、沸騰により脱気させた精製水を加え、1000倍に希釈した溶液を用いた（pH=9.67）。

③ 中性溶液

中性溶液は、他の酸性溶液・アルカリ性溶液と比較するため、市販の精製水（日本薬局方 pH=6.0）を使用した。

4・2・3 実験方法

2lの三角フラスコに試料200gを採り、浸漬溶液2lを加えて一定期間浸漬させた。浸漬温度は30℃とした。これら浸漬試験条件を表8に示す。

浸漬後、6時間、3日、1週間、2週間、3週間、

表8 浸漬試験条件

試料種類・粒径・量	浸漬溶液	浸漬期間	温度
再生砕石-A (40-0mm) 40g C (40-0mm) 40g F (40-0mm) 40g I (40-0mm) 40g J (40-0mm) 40g 合計 200g	酸性 2l	↓ 6時間 (0.25日)	30℃
	中性 2l	↓	
	7%加性 2l	3日	
		↓	
		1週間 (7日)	
再生砂-A (10-0mm) 40g C (13-0mm) 40g F (8-0mm) 40g I (10-0mm) 40g J (5-0mm) 40g 合計 200g	酸性 2l	↓ 2週間 (14日)	
	中性 2l	↓	
	7%加性 2l	3週間 (21日)	
		↓	
		1か月 (28日)	
バージン材 200g	酸性 2l	↓ 2か月 (56日)	
	中性 2l	↓	
	7%加性 2l	3か月 (84日)	

4週間（1か月）、2か月、3か月の計8回、傾斜法により上澄み液250mlを分取した。分取後は等量の浸漬溶液を加え、再び2lとした。ただし、再生砂に関しては、表面に浮遊物があるため、1か月までは浮遊物のない中層から、サイホンにより分取した。

分取した試料については、pH、EC、酸化還元電位（Eh）、COD、六価クロム、塩類および金属類を分析した。

分析方法は、JIS-K0102に準じた。pHはガラス電極法、ECは電気伝導度計、Ehは白金電極法、CODは約100℃、30分過マンガン酸カリウム消費量により求めた。塩類および金属類の分析は、硝酸分解後、原子吸光法により行った。分析項目は、Cd、Pb、Cu、Zn、Fe、Mn、Ni、Na、K、Ca、Mg、Si、Alについて行った。なお、Hgは還元気化原子吸光法に、Asはジエチルジチオカルバミン酸銀吸光光度法による。六価クロムはジフェニルカルバジド吸光光度法を用い

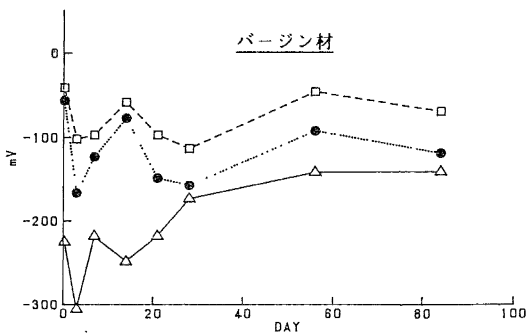
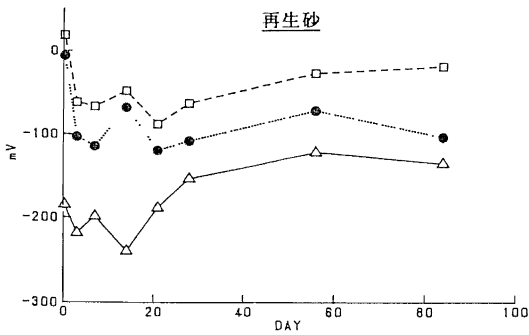
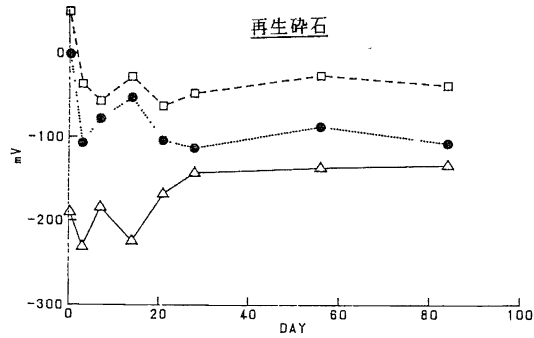


図4 酸化還元電位 (Eh) の経時変化

(△——△: 酸性溶液
●……●: 中性溶液
□-----□: アルカリ性溶液)

た。また、Siは全浸漬試料を合わせたものを1試料として分析した。

4・2・4 浸漬試験結果および考察

今回の浸漬試験は、酸性・中性・アルカリ性と液性を変えて行った。しかし、実際には、浸漬溶液の塩類濃度よりもコンクリートから溶出してくる塩類濃度の方が高いため、6時間から3カ月までは、ほとんどの項目で液性による明白な差が認められなかった。他方、液性による違いが顕著に現れたのは、図4に示すEhで、アルカリ性溶液>中性溶液>酸性溶液の順に浸漬溶液のEh値が高くなった。特に、酸性溶液で還元状態になりやすい傾向を示した。

その他の項目においては、再生砂とバージン材での液性の違いがさほどなく、ほとんど同じ値を示した。

しかし、再生砕石だけは、Ca、EC、pH、Na、 Cr^{6+} 等で液性の違いによる若干の差が見られた。その結果を図5に示す。Ca、EC、pHは中性溶液で、 Cr^{6+} は酸性溶液で、Naはアルカリ性溶液で、幾分高い値を示した。これは、液性による溶出傾向の違いと考えられる。再生砕石だけに液性による差が生じたのは、素材の違いや粒径の違いによるところが大きいものと考えられる。

そこで、再生砕石の液性による溶出傾向の違いを、溶出成分の大半を占めているCaについて考察した。一般に、コンクリートの主成分であるCaOの溶解度は酸性溶液>中性溶液>アルカリ性溶液の順に高くなる。しかし、今回の実験では、酸性溶液よりも中性溶液でCaの溶出量が多くなっていた。これは、酸性溶液に添加されている硫酸イオンにより、溶解度の低い $CaSO_4$ が形成されたためと考えられる。しかし、バージン材や再生砂で液性の差が生じなかったのは、おそらく、Caの溶出量が高いために、浸漬溶液のpH緩衝能が打ち消されて、溶液の差が生じなかったものと考えられる。

また、試料の違いによるCaの溶出量は、表面積の大きさに比例して多くなるので、表面積の小さな再生砕石の場合は、Caの溶出量が少ないために浸漬溶液のpHの差が現れたものと思われる。

再生砕石でも、Caなどの一部の項目を除いて液性の違いによる溶出傾向の差が明白には認められなかった。したがって、最近問題になっている酸性雨の影響を考えた場合、以上の結果から中性溶液と酸性溶液の差は認めにくいことから、pH3.9前後の強酸性の降雨

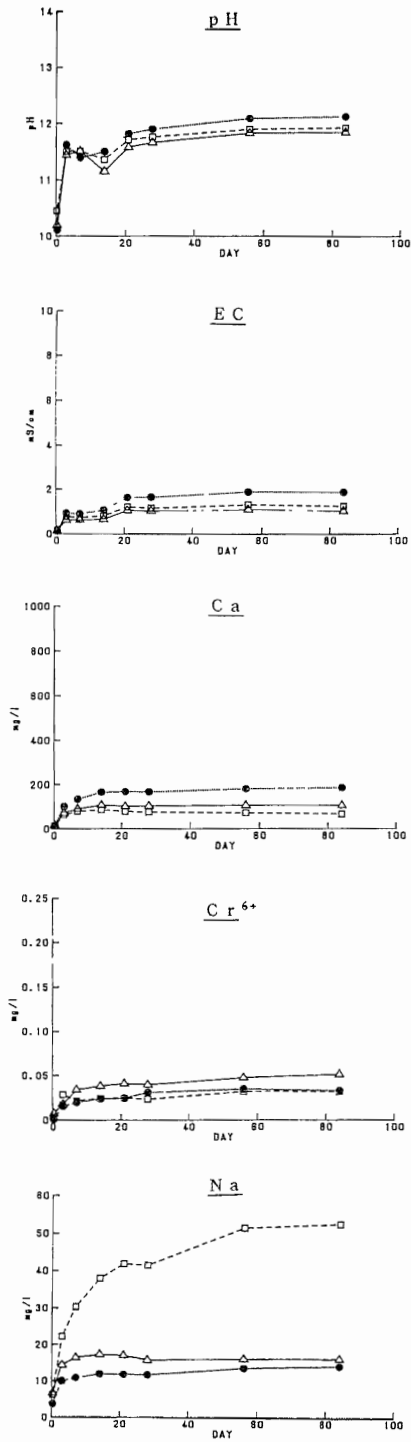


図5 再生砕石の浸漬試験結果

(△——△ 酸性溶液)
 (●……● 中性溶液)
 (□-----□ アルカリ性溶液)

があった場合でも、金属類や塩類の溶出による環境影響は小さいものと思われる。

ところで、コンクリートに接した溶液は強アルカリ性となるために、環境への影響が示唆される。しかし、強アルカリ性となって環境へ排出されたとしても、溶液中の炭酸イオンによる不溶性のCaCO₃の形成や酸性土壌へのCaの吸着による中性化により、環境影響はないと考えられる¹³⁾。

このように、浸漬溶液の液性の違いによる差が明白に現れなかったため、以後は中性溶液について検討することとした。

まずはじめに、塩類や金属類の総溶出量について検討した。総溶出量は、試料の種類毎にそれぞれ、6時間から3カ月までの溶出量を合計して求めた。その結果を図6に示した。

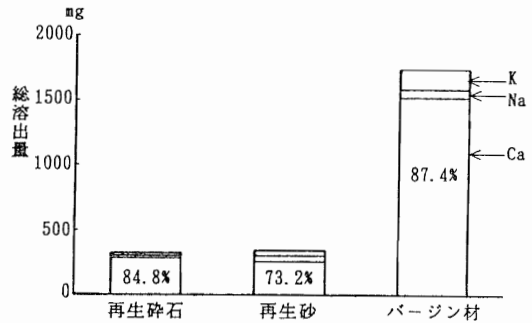


図6 塩類および金属類の総溶出量

溶出成分の構成比が最も高いのはCaで、すべての試料で70%以上を占めていた。他の成分では、Na、Kの溶出量が多く、溶出成分の構成比が11.9~23.2%の範囲であった。これらのNa、Kは、セメント中にNa₂SO₄・K₂SO₄として存在している成分が溶出してきたものと考えられる。金属類では、溶出成分の構成比からみるとほとんど溶出していないが、AlとSiは、若干量ではあるが、1.2~2.3%の範囲で溶出していた。

試料間の差をみると、主な溶出成分であるCaの溶出量が、バージン材>再生砕石>再生砂の順であった。Caの次に溶出量の多いNaとKをみると、バージン材ではK>Naとなり、再生材ではNa>Kとなる関係にあった。

次に、pHでの試料間の差についてみると、図7に示したとおり、6時間後には既に、再生砕石が10.1、

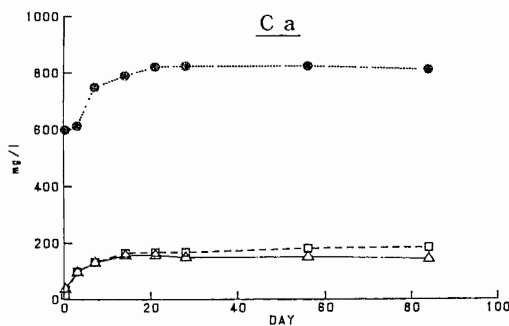
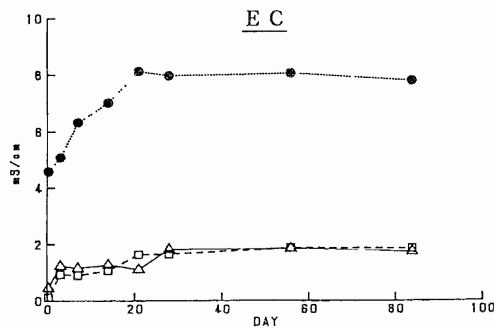
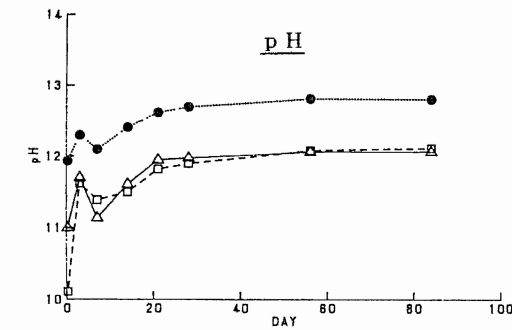


図7 pH, ECおよびCaの経時変化

●.....● バージン材
 □-----□ 再生砕石
 △——△ 再生砂

再生砂が11.0, バージン材が11.9と強アルカリ性を示していた。

pH, ECおよびCaの経時変化でも図7に示したように, ほぼ同様な変化パターンを示し, 試料の違いによる相関も高かった。このことから, 溶出成分の70%以上を占めるCaが, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ となってpHを上昇させ, さらにECをも高くしていることが予想できる。

Ca以外の, 塩類の経時変化を図8に示した。Mgはほとんど溶出せず, NaとKが溶出していることが分かる。NaとKでの試料による違いは, バージン材>再生砂>再生砕石の順に溶出量が高く, またバージン材は山型の溶出パターンを, 再生砂と再生砕石は時間の経過とともに一定値を示したことである。

金属類では, Hg, Cd, Pb, As, Mn, Niの溶出は全くみられなかった。セメントの主成分であるFeについては, 時間とともに溶出してくると考えられたが, 浸漬時間が経過しても溶出量が増えることはなかった。これは, 浸漬溶液がアルカリ性となり, 水酸化物を形成して不溶性となったためと考えられる。ただし, 再生砂のみに, 微量ではあるがCuの溶出がみられた。

金属類の中で, 特に溶出しやすい傾向を示したものは Cr^{6+} であった。 Cr^{6+} の溶出傾向を図9に示す。再生砕石からの Cr^{6+} の溶出量は少量であったが, 再生砂からの Cr^{6+} の溶出量は徐々に増えている。再生砂での Cr^{6+} の溶出量が多いのは, 表面積が大きく, 溶出しやすいもろい構造のためであろうと推察できる。逆に, バージン材では, 最初に高濃度の Cr^{6+} が溶出したが, 時間とともに急激に減少し, 再生砕石と同じ濃度にまでなった。バージン材における Cr^{6+} の急激な減少は, 図9で示したように, CODの経時変化と類似している。浸漬当初にCOD値が高くなるのは, 還元性物質が存在しているためと考えられる。還元性物質としては, たとえばバージン材に添加されている高分子化学糊が考えられる。実際, 図9に示したように, バージン材でのEhが, 最初の1カ月間は, 他の再生材に比べて低く, 還元状態にある。このために, Cr^{6+} は Cr^{2+} や Cr^{3+} に還元される。この Cr^{2+} や Cr^{3+} が, アルカリ性溶液中では水酸化物の沈澱を作るために, 不溶性となったものと考えられる。

次に, セメントは, 粘土に石灰を作用させて形成されている。そこで, 粘土の結晶構造の骨格をなすSiとAl成分の溶出についても調べた。

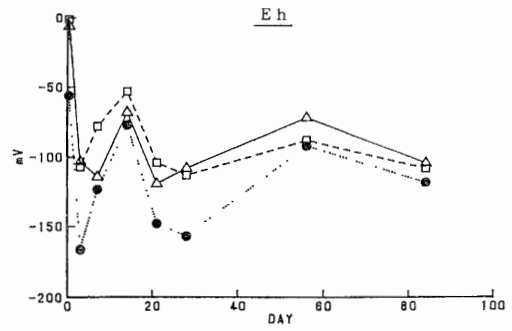
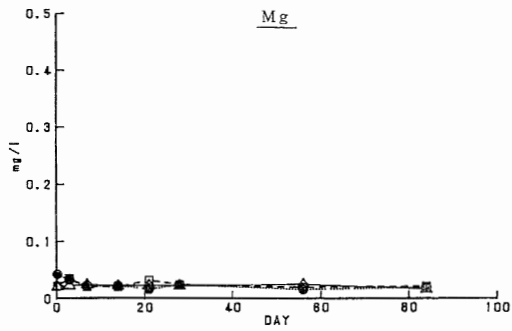
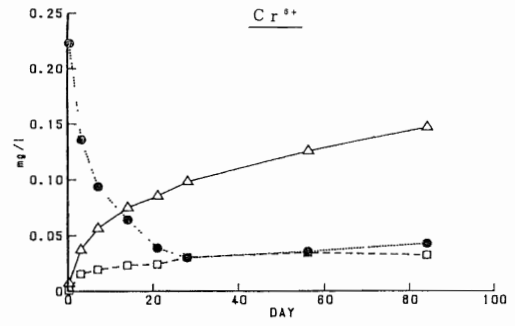
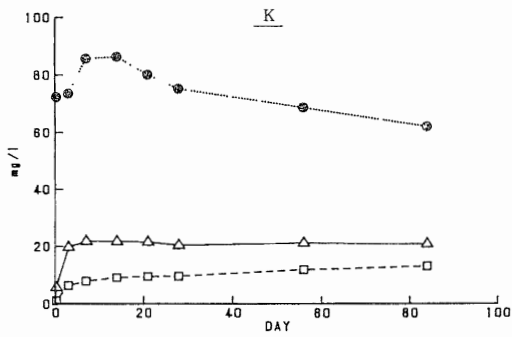
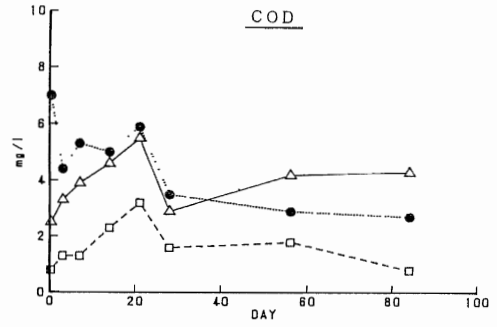
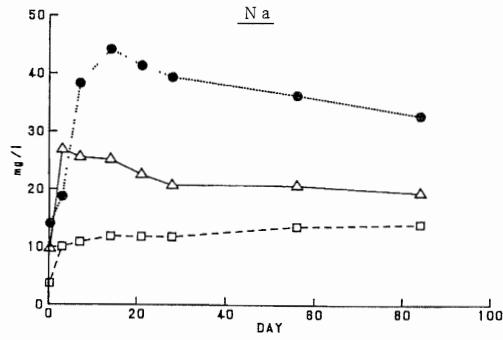


図8 Na, KおよびMgの経時変化

図9 COD, Cr⁶⁺およびEhの経時変化

●●●●● 破損材
 □□□□□ 再生砕石
 △△△△△ 再生砂

●●●●● 破損材
 □□□□□ 再生砕石
 △△△△△ 再生砂

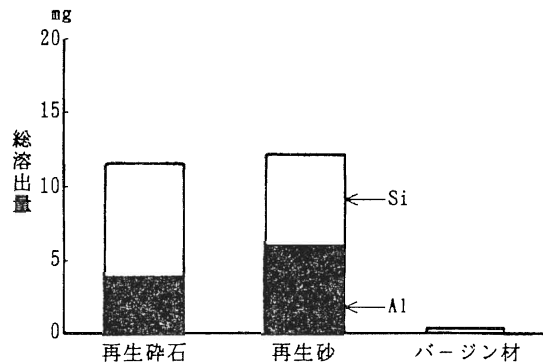


図10 SiとAlの総溶出量

図10にSiとAlの浸漬試験の結果を示す。バージン材にはSiとAlの溶出がほとんどみられないが、再生材からは溶出している。再生砕石ではSiの溶出割合が大きく、再生砂の場合はSiとAlがほとんど同じ割合で溶出している。また、SiとAlの溶出量の合計は、再生砕石と再生砂で、ほとんど同じ値となった。バージン材に比べて再生材で多量にSiとAlが溶出したのは、バージン材の骨格が強固なため溶出しにくいのに対して、再生材では風化が進行しているため、SiとAlの結晶構造の骨格が崩れやすく、もろくなったためと考えられる。また、破碎により、骨格が崩れてもろくなり、再生材のセメント付着部分の強度が低くなることも本田ら¹⁰⁾は指摘している。

5 まとめ

コンクリート廃材の処理および再利用について、県内のコンクリート廃材中間処理施設の実態調査を行った。さらに、再生材の再利用時の環境汚染について検討するため、溶出試験や浸漬試験を行った。

埼玉県におけるコンクリート廃材の発生量（昭和63年度）は、約73.5万tで、全産業廃棄物発生量の5.1%を占めていた。そのうち、最終処分量が15.2万tで、処分先は70%が県外であった。このため、再生利用率をさらに高め、県外での最終処分量を削減することが、社会的にも重要な課題となっている。

1) 県内には現在47カ所のコンクリート廃材中間処理施設が稼働しており、このうち9カ所について実態調査を行った。以下、結果を示す。

① 中間処理施設におけるコンクリート廃材の受入先は、90%以上が県内からであり、受入量は、施

設の規模により異なるが840~96,000 t/年の範囲にあった。また、受入量は工事の多い冬期に多くなっていた。

② コンクリート廃材はすべて破碎処理され、その後粒径を整え、再生砕石と再生砂に分けられていた。再生砕石は切込砕石などとして、再生砂は埋戻し用砂質土や盛土として用いられていた。再生材の利用先は、公共工事や民間工事での利用比率は約4:6であった。

③ 再利用の促進という観点から、再生砕石を公共工事の路盤用切込砕石や骨材として利用するには、JIS規格等に合格しなければならないが、再生砕石はこの規格強度を満足していなかった。これは、骨材に付着したセメント水和物由来のもと考えられている。骨材の強度を低下させない処理としては、現在、高度処理としてセメント水和物を除去する方法が執られている。また、セメントの焼成方法の検討や、セメント水和物の剥離を防止するための接合材の開発が必要であると思われる。

2) 再生砕石や再生砂の利用にあたって、環境への影響を調べるため、溶出試験を行った。

- ① 再生砕石と再生砂のpHはいずれも12前後で、再生砕石よりは再生砂の方が幾分高い値を示した。
- ② セメントの主成分であるCaが多量に溶出しているために、pHとECが高くなった。
- ③ 有害物質の中では、Cr⁶⁺が平均0.06ppm溶出された。

溶出試験から推察すると、環境に影響を与える因子は、pHとCr⁶⁺であることが判明した。

3) 溶出試験で溶出された物質の経時変化について検討するため、浸漬試験を行った。浸漬試験は、酸性・中性・アルカリ性と液性を変えて行った。

- ① 液性の違いについて検討した結果、コンクリートから溶出した多量のCaによって、浸漬溶液のpH緩衝能が打ち消されて、液性による顕著な差が認められなかった。
- ② 塩類や金属類の総溶出量をみると、Caが約80%を占め、次いでNaとKが11.9~23.2%の範囲であった。試料間の差をみると、Caの溶出量が、バージン材>再生砕石>再生砂の順であった。NaとKをみると、バージン材ではK>Naとなり、再生材ではNa≧Kとなる関係にあった。

SiとAlについては、バージン材では溶出が認

められず、再生材からは検出された。これは、バージン材の骨格が強固なため溶出しにくいのに対して、再生材では風化が進行しているため、SiとAlの結晶構造の骨格が崩れやすくなったためと考えられる。

- ③ 経時変化についてみると、pHは強アルカリ性のまま推移した。pHはECおよびCaと同様な変化パターンを示していたことから、pHとECはCaの影響が大きいものと考えられる。

金属類の中で特に溶出しやすい傾向を示したものはCr⁶⁺であった。再生砕石からのCr⁶⁺の溶出は少量であったが、再生砂からのCr⁶⁺の溶出量は徐々に増加した。バージン材におけるCr⁶⁺の急激な減少はCODの経時変化と類似していた。

- 4) 今後の再利用にあたっては、埋戻し用砂質土や盛土以外に、再生骨材分野での利用を促進する必要がある。

溶出試験や浸漬試験から判断すると、再生材からの溶出液が強アルカリ性になることと、微量ではあるがCr⁶⁺が検出されたことに留意する必要がある。

強アルカリ性溶液については、酸性土壌により中性化されることから、酸性土壌と併用して用いるか酸性土壌地域で再利用すれば、環境に与える影響を少なくすることができる。

Cr⁶⁺については、溶出・浸漬試験結果を仮に、「土壌の汚染に係る環境基準」の0.05ppmにあてはめたとすれば、この基準を超える場合がある。しかし、利用部位が地下水面から離れており、地下水が0.05ppmを超えない場合の基準は0.15ppmが適応される。したがって、利用地域の状況を判断して再利用すれば、環境に与える影響は少ないものと考えられる。また、Cr⁶⁺は、原料であるセメントの焼成時に生成されると思われるので、原料での削減や焼成方法の検討および再利用時における環境中の動向を研究する必要がある。

しかしながら、強アルカリ性溶出液やCr⁶⁺の溶出および強度の低下などの問題点は、再生材に付着したセメント成分を除去することにより、事前に防ぐことができると考えられる。このため、高度処理工程を加えるなど、抜本的な改善策の検討が、今後必要と思われる。

文 献

- 1) 埼玉県環境部：埼玉県産業廃棄物実態調査報告書，1990。
- 2) 渡辺洋一ら：産業廃棄物中間処理に関する研究(IV)，埼玉県公害センター研究報告，[19]，91-106，1992。
- 3) 日本化学会編：化学便覧 応用編，丸善(株)，1971。
- 4) 吉沢四郎ら著：無機工業化学，(朝倉書店，1969。
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト：「建設事業への廃棄物利用技術の開発」概要報告書
- 6) 建築業協会建設廃棄物処理再利用委員会：再生骨材コンクリートに関する研究，コンクリート工学，vol-16，No 7，1978。
- 7) 日本規格協会：JIS-A 1102~1105，A 1109~1110，A1121，A5201，A1126，1986。
- 8) 「埼玉県土木工事実務要覧」：埼玉県，1986。
- 9) (株)日本土木工業協会，(株)日本電力建設業協会，環境委員会廃棄物専門部会篇：コンクリート破片の再生利用等の実態調査報告書，31-32，1991。
- 10) 本田淳裕，山田優共著：建設系廃棄物の処理と再利用，(財)省エネルギーセンター，1990。
- 11) 荒井康夫著：セメントの材料化学，大日本図書(株)，1991。
- 12) 埼玉県：環境白書，1991年版
- 13) 加藤弘通ら：コンクリート固化処理物の経時変化について(その2)，第3回廃棄物学会研究発表会講演論文集，583-586，1992。