

コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価

橋本征二¹・広池秀人²・寺島泰³

¹正会員 工博 京都大学研修員 工学研究科環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²京都大学大学院修士課程 工学研究科環境工学専攻

³フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科環境工学専攻

コンクリートがらの路盤材用再生砕石としてのリサイクルを対象として、環境面から LCA 的な評価を行い、次の結論を得た。1) コンクリートがらを路盤材用再生砕石としてリサイクルすることは、廃棄物を抑制するのみならず、別の多くの環境負荷も低減する。ただし、再生工場への輸送距離が処分場への輸送距離以上になる場合には、この限りではない。2) リサイクルケースでさらに負荷を低減する方策としては、破碎の前処理にかかる軽油の使用量を削減することが考えられる。また、CO₂、SOx、NOx の削減については、輸送距離を考慮することが重要である。

Key Words: construction waste, demolition waste, concrete waste, aggregate, transportation

1. はじめに

今日の廃棄物問題において建設業の占める位置は大きい。投入資源の約 5 割は建設資材であり¹⁾、産業廃棄物の約 2 割は建設業から発生²⁾、最終処分される産業廃棄物の約 5 割を建設廃棄物が占め³⁾、不法投棄の約 9 割は建設業から発生³⁾ しているという状況である。さらに今後は、これまでに蓄積された土木構造物・建築物の解体・更新に伴い、解体廃棄物の増加が予想される^{1), 4)} が、これにより建設廃棄物の問題は一層深刻なものとなる可能性がある。

これらに対処するには、まず、解体廃棄物の発生を土木構造物・建築物の長寿命化などにより抑制し、次に発生した廃棄物についてはできるだけリサイクルし、最後にどうしてもリサイクルできないものを適正に処理していくことが必要である。しかし、長寿命化やリサイクルについては、それによって廃棄物が抑制される反面、別の環境負荷が新たに生じると考えられる。よって、これらについては環境面からの LCA 的な評価が必要であろう。そして、これらの環境負荷が大きい場合には、それに対する対策を講じなければならない。

本稿では、前稿⁵⁾ に引き続きリサイクルが引き起こす環境負荷について検討したが、その対象として、建設業から排出される廃棄物の中でも大きな割合を

占めるコンクリートがら⁶⁾ を取り上げた。コンクリートがらのリサイクル率は、建設省⁶⁾ によると 65 % であるが、これらのほとんどは再生砕石となり、主に路盤材として利用されている。本稿では、リサイクルの更なる促進に寄与することを目的として、コンクリートがらの路盤材用再生砕石 (以下、「再生砕石」と略記) としてのリサイクルについて LCA 的な評価を行うとともに、リサイクルの環境負荷を低減するための方策について検討した。再生砕石としてのリサイクルについては、岩淵ら⁷⁾ がその製造に関わるエネルギー消費量と CO₂ 排出量を試算しているが、今後の課題としてデータの一般性と他の環境負荷の考慮、適切なシステム境界の設定を挙げている。本稿では、新たに 3 件の再生砕石製造業者のデータを収集するとともに、他の環境負荷も考慮し、適切なシステム境界を設定して検討を行った。

2. システム境界と機能単位

(1) システム境界とリサイクルの取り扱い

本稿で取り上げたりサイクル (コンクリートがらの再生砕石としてのリサイクル) は、オープンループリサイクルと称されるものであり、図-1 のようにある製品システム (「製品 A」とする) から排出されたリサイクル対象物が、再び製品 A のシステムに

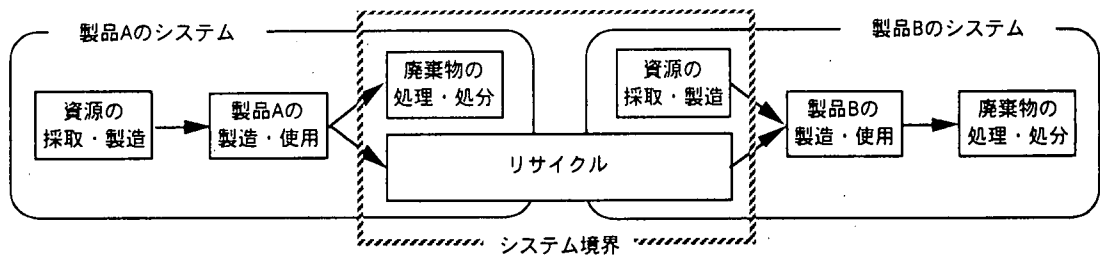


図-1 オープンループリサイクルと本稿におけるシステム境界

戻るのでなく、別の製品システム（「製品B」とする）に入るリサイクルである。

LCAを実施するにあたっては、このリサイクルのプロセスが製品A及びBのいずれのシステムに属するのが問題となるが、図-1のように製品Aと製品Bのシステムをトータルに見ると、リサイクルのプロセスが新たに生ずる代わりに、製品Aの廃棄物処理・処分、製品Bの資源採取・製造の各プロセスが不必要となることが分かる。本稿でも前稿⁵⁾と同様、図-1のようにシステム境界を設定した。

なお、このシステム境界内にも、更にオープンループのリサイクルプロセスは存在する（例えばコンクリートがらから分別される鉄くずのリサイクル。以下「サブのオープンループ」と記述）。これについては、必要とされる再生品の品質によって収集方法と処理方法が決まるため、再生品を利用する側の製品のシステムとした⁶⁾。また、プラントの建設・各種機器の製造など、資本財生産に関わるプロセスについて、本稿は考慮しない。

(2) 想定するシナリオと機能単位

本稿で想定するシナリオを示したのが図-2である。リサイクルケースの比較対象として、コンクリートがらが管理型処分場に廃棄され、新たにバージン砕石が製造される管理型廃棄ケース、安定型処分場に廃棄され、新たにバージン砕石が製造される安定型廃棄ケースを想定した。廃棄ケースを管理型廃棄ケースと安定型廃棄ケースに分けたのは、コンクリートがらが安定5品目の1つであるにも関わらず、実際には管理型処分場で処分される場合も多く、また、今後新規に安定型処分場をつくるのが困難であると考えられるためである。

また、機能単位は路盤材用砕石1トンとした。

3. インベントリー分析

(1) インベントリー分析の方法

インベントリー分析には、積み上げ法と産業連関

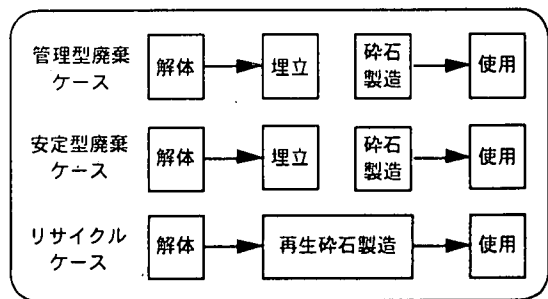


図-2 シナリオ

法とがある⁹⁾。積み上げ法は、個々のプロセスにおける環境負荷を調査して積み上げることから、詳細なプロセス分析が可能な反面、多様な資材を用いる製品では、データ収集が現実的に困難である。一方、産業連関法は、産業連関表を基礎データとして使用することから、分析の精度あるいは確度は落ちるものの、包括的な分析が可能である。

本稿では、基本的に積み上げ法を採用し、データ収集が困難であった資材について、筆者らが産業連関法により算出した原単位⁵⁾を用いた。

図-2で示した各シナリオに関連するプロセスを、管理型廃棄ケース、リサイクルケースについて示したのが図-3、図-4である。図中では同時に、それぞれのプロセスが、積み上げ法及び産業連関法のいずれかで計算されたかを示してある。なお、これらのプロセスで使用される電力、石油製品にかかる負荷は産業連関法により計算される原単位を用いた。

また、「鉄屑再生(図-4)」がこのシステム境界中に存在するサブのオープンループである。

(2) 分析の項目

a) 投入される資源

エネルギーの使用及び石油化学製品の製造等に関連する資源として、原料炭、一般炭、原油、LNG、天然ガスを、これらの他に日本において投入の多い資源への波及を検討するために、鉄鉱石、石灰石、木材を、また本稿で分析する直接的な資源として骨材を

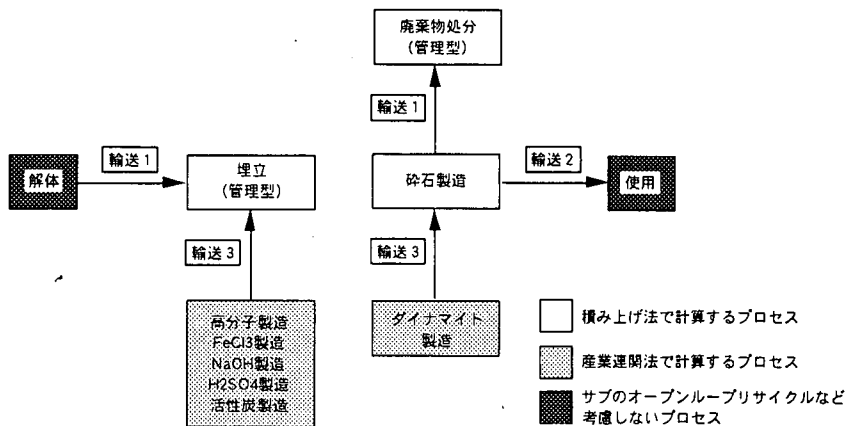


図-3 管理型廃棄ケース

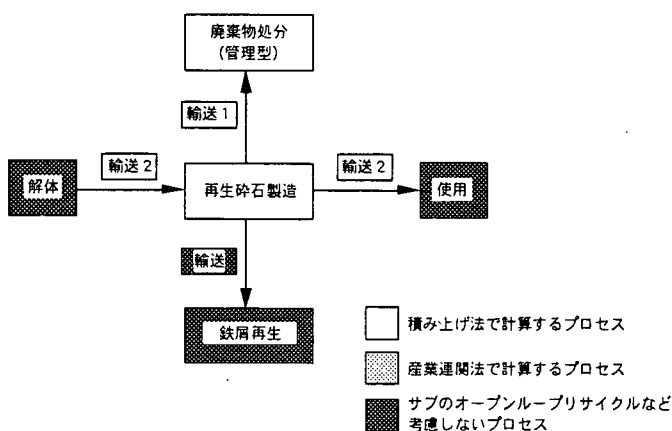


図-4 リサイクルケース

取り上げた。さらに、エネルギー関連資源をエネルギー（化石燃料等起源、バイオマス起源）換算した（10項目）。

b) 排出される廃物

エネルギーの使用等に関連する廃物としてCO₂（化石燃料等起源、バイオマス起源）、SOx、NOxを、廃棄物の環境への直接的な排出として埋立廃棄物を取り上げた（4項目）。

(3) プロセスデータの収集

図-3、図-4において、積み上げ法により計算を行うプロセスでは、以下のデータを用いた。また、以下で収集されたプロセスデータのうち、産業連関法により算出された原単位（生産者価格当たり）⁵⁾を用いて負荷の計算を行うものについては、産業連関表国内生産額表¹⁰⁾を用いて価格に換算した。

a) 化石燃料の発熱量原単位

化石燃料の発熱量を計算するに当たっては、資源

エネルギー庁の原単位¹¹⁾を用いた。

b) 埋立プロセス

京都府内にある管理型の最終処分業者2社⁵⁾、安定型の最終処分業者1社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得た。表中には和田ら¹²⁾が収集した管理型のデータを参考として付記した。

管理型については、まず、業者によって使用する薬品の種類が大きく異なる。また、埋立にかかる軽油の消費量に大きな違いは見られないものの、水処理にかかる電力の消費量は4倍程度の開きがある。これは、処分場の規模、埋立の進行具合によって、浸出水の量と質が異なるためである。管理型について本稿では、pH調整剤としてFeCl₂、NaOH、凝集剤としてPAA、最終的な処理として活性炭を使用するものとして、暫定的に軽油、電力とともに3社の値を平均して用いた。

なお、複数の異なる廃棄物が同時に埋立されるが、これらによる負荷は廃棄物の種類にかかわらず同じ

表-1 収集したプロセスデータ

		埋立				碎石製造			再生碎石製造		
		管理型	管理型	安定型	管理型	D社	E社	F社	G社	H社	I社
		A社	B社	C社	和田ら ¹²⁾						
NaOH	kg	-1.86E-4	-1.01E-4								
活性炭	kg	-2.77E-4									
FeCl ₂	kg	-8.30E-4			-1.30E-4						
PAA	kg	-1.11E-5	-1.11E-5		-2.60E-6						
PAC	kg		-3.19E-4								
硫酸	kg		-1.01E-4								
リン酸	kg		-4.03E-5								
メタノール	kg				-8.50E-5						
ダイナイト	kg					-3.03E-6	-2.16E-5	-1.23E-5			
軽油	ℓ	-1.43E-3	-8.23E-4	-1.89E-3	-9.40E-4	-6.80E-4	-5.09E-4	-8.33E-4	-2.04E-3	-1.21E-3	-1.84E-3
電力	kWh	-4.58E-3	-8.06E-3		-2.00E-3	-2.28E-3	-1.93E-3	-2.50E-3	-2.10E-3	-4.30E-4	
碎石	kg					1.00E+0	1.00E+0	1.00E+0			
再生碎石	kg								1.00E+0	1.00E+0	1.00E+0
コンクリートがら	kg								-1.01E+0	-1.01E+0	-1.00E+0
鉄屑	kg								8.86E-3	1.03E-3	3.69E-3
廃棄物	kg	-1.00E+0	-1.00E+0	-1.00E+0	-1.00E+0						8.13E-4

注) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

表-2 プロセスデータの比較 (再生碎石 1kg あたり)

		G社	H社	I社	岩淵ら ⁷⁾	
					ヒアリング	見積み
CO ₂	g-C	1.86	1.00	1.44	0.41	0.86
エネルギー	-kcal	-23.46	-12.14	-16.96	-6.03	-12.48

注) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗

表-3 輸送の想定

	輸送手段	輸送距離(km)
輸送1	4tトラック	30
輸送2	4tトラック	10
輸送3	4tトラック	100

と考え、重量で負荷を割り振ることとした。管理型については、純粋なコンクリートがらであれば浸出水への負荷はないが、実際には木くず等の異物が混入すること、また、浸出水への負荷がないとした場合の計算は安定型廃棄ケースに相当することから、安定型と同じく重量で負荷を割り振っている。また、実際には埋立地としての機能が終了した後も浸出水の処理は必要であるが、本稿ではその負荷を考慮できていない。

c) 碎石製造プロセス

京都府内にある碎石業者3社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得た。ダイナイトの値が大きく異なるが、今回対象とした負荷にはほとんど影響を与えなかったことから、軽油、電力とともに、3社の値を平均して用いた。

d) 再生碎石製造プロセス

京都府内にある再生碎石製造業者3社についてヒアリングと見学を行い、表-1に示すデータを得た。これらは、荒割り、異物除去(鉄筋、木くずなど)、破碎等、全ての工程を含んだ値である。また、ふるい分けの工程を含む業者もあるが、最終製品は基本的に所定の粒径以下になるよう割ったクラッシュラン(JISA 5001)であるとした。破碎プラントの動力が、G社-電力、H社-電力及び軽油、I社-軽油であつ

たため、これらは同一に扱えない。そこでそれぞれ、リサイクルケース1、リサイクルケース2、リサイクルケース3とした。

また、今回収集した3社のデータから、岩淵ら⁷⁾が用いている原単位を同様に用いて、CO₂排出量、エネルギー消費量を算出し、岩淵らの結果と比較したものが表-2である。岩淵らは、ヒアリングとともにプラント仕様からの見積みも行っているが、今回収集したデータは見積みの方に近く、ヒアリングの2~4倍の値となっている。従って、どの業者で再生するかによって、結果は大きく異なる可能性がある。本稿では上記の通り、3つのケースを想定した。

e) 輸送プロセス

輸送プロセスは、図-3、図-4の輸送1~輸送3であり、京都市における輸送の実態を考慮して表-3のように設定した。輸送にかかわる燃料消費とCO₂、SOx、NOx排出については、(社)プラスチック処理促進協会の係数¹³⁾を用いた。

4. 結果と考察

計算結果は表-4のとおりである。すべての項目においてリサイクルケースの負荷が小さい結果と

表-4 インベントリー表 (砕石1トンあたり)

		リサイクル1	リサイクル2	リサイクル3	安定型廃棄	管理型廃棄
資源	原料炭 kg	-1.94E-2 ○	-6.16E-3 ○	-5.38E-3 ○	-2.37E-2 ●	-4.37E-1 ●
	一般炭 kg	-1.06E-1 ○	-2.88E-2 ○	-1.64E-2 ○	-1.18E-1 ●	-4.55E-1 ●
	原油 l	-2.47E+0 ○	-1.43E+0 ○	-2.13E+0 ○	-3.11E+0 ●	-2.78E+0 ●
	LNG kg	-9.22E-2 ○	-2.11E-2 ○	-5.20E-3 ○	-1.00E-1 ●	-3.91E-1 ●
	天然ガス m3	-3.71E-3 ○	-9.08E-4 ○	-3.51E-4 ○	-4.19E-3 ●	-2.14E-2 ●
	鉄鉱石 kg	-9.30E-3 ○	-4.62E-3 ○	-6.28E-3 ○	-1.15E-2 ●	-2.66E-2 ●
	石灰石 kg	-1.38E-2 ○	-7.04E-3 ○	-9.95E-3 ○	-1.85E-2 ●	-2.48E-1 ●
	骨材 kg	-3.28E-3 ○	-1.13E-3 ○	-1.06E-3 ○	-1.00E+3 ●	-1.00E+3 ●
	木材 m3	-7.37E-6 ○	-3.06E-6 ○	-3.61E-6 ○	-1.02E-5 ●	-4.04E-5 ●
	廃物	CO2 kg	9.17E+0 ○	6.01E+0 ○	7.57E+0 ○	1.32E+1 ●
f-CO2 kg		9.14E+0 ○	5.99E+0 ○	7.55E+0 ○	1.31E+1 ●	1.57E+1 ●
b-CO2 kg		2.85E-2 ○	1.56E-2 ○	2.25E-2 ○	3.67E-2 ●	8.30E-2 ●
SOx kg		1.15E-2 ○	7.69E-3 ○	9.98E-3 ○	1.65E-2 ●	1.80E-2 ●
NOx kg		2.90E-2 ○	1.97E-2 ○	2.57E-2 ○	4.18E-2 ●	4.08E-2 ●
埋立廃棄物 kg		2.01E-1 ○	1.10E-1 ○	9.71E-1 ○	1.01E+3 ●	1.01E+3 ●
エネルギー		Iエネルギー Mcal	-3.62E+1 ○	-2.28E+1 ○	-2.85E+1 ○	-5.10E+1 ●
	f-Iエネルギー Mcal	-3.45E+1 ○	-2.18E+1 ○	-2.70E+1 ○	-4.88E+1 ●	-6.34E+1 ●
	b-Iエネルギー Mcal	-1.71E+0 ○	-1.02E+0 ○	-1.54E+0 ○	-2.16E+0 ●	-1.61E+0 ●

注1) f=化石燃料等 b=バイオマス
 注2) 正の値=排出 負の値=投入 E+x=10のx乗
 注3) ○=負荷が小さい ●=負荷が大きい

なった。ただし、リサイクルケース1と安定型廃棄ケースの値は接近している。廃棄ケースで負荷が大きいのは、埋立にかかる軽油や浸出水処理にかかる電力などが追加的に加わるためである。なお、廃棄ケースにおいても、コンクリート塊が大きい場合には埋立前の荒割りが必要となる場合もあるが、本稿においてこれは埋立プロセスのプロセスデータの中に丸め込まれている。

3つのリサイクルケースを比較すると、破碎プラントの動力として電力を用いたリサイクルケース1の負荷が大きくなっている。しかしながら、このことは、破碎プラントの動力として軽油を用いるのが良い、ということを示してはいない。図-5は、CO₂排出量を工程別に見たものである(ここで示される再生砕石製造の負荷は軽油の使用によるもののみとなっている)。図によると、ケース1において電力の負荷はそれほど大きくない。ケース1で負荷が大きいのは、破碎プラントにコンクリートがらを投入する前処理(荒割り、異物除去)で多くの軽油を使用しているためである。すなわち、前処理にかかる軽油の使用量が結果に大きな影響を及ぼしている。実際、動力として軽油を用いていたケース3において、使用される軽油の約9割が前処理を行う重機用であった。

さらに、輸送にかかる負荷が大きな割合を占めることから、輸送2(表-3)に輸送1と同じ30km、さらに輸送1を越える40kmという値を代入して計算を行った。その結果、30kmの場合に、CO₂、SOx、

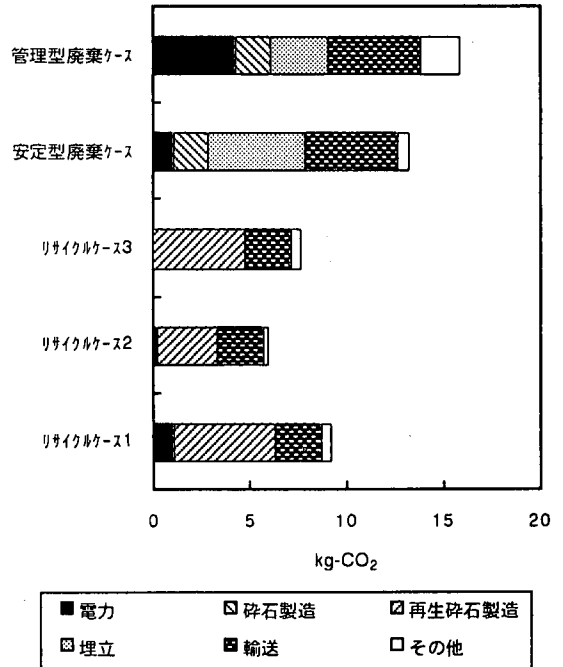


図-5 CO₂排出量の内訳

NOx排出量でリサイクルケース1が安定型廃棄ケースを上回り、40kmの場合に、リサイクルケース2と安定型廃棄ケースが同等となった。ただし、他の項目の相対的な順序に影響はなかった。

リサイクルケースでさらに負荷を低減する方策としては、破碎の前処理にかかる軽油の使用量を削減することが考えられる。また、CO₂、SOx、NOxの

低減については、輸送距離を考慮することが重要である。

5. おわりに

最後に、結論と課題をまとめる。本稿では、コンクリートがらの路盤材用再生砕石としてのリサイクルを対象として、環境面から LCA 的な評価を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) コンクリートがらを路盤材用再生砕石としてリサイクルすることは、廃棄物を抑制するのみならず、別の多くの環境負荷も低減する。ただし、再生工場への輸送距離が処分場への輸送距離以上になる場合には、この限りではない。
 - 2) リサイクルケースでさらに負荷を低減する方策としては、破碎の前処理（荒割り、異物除去）にかかる軽油の使用量を削減することが考えられる。また、CO₂、SO_x、NO_x の低減については、輸送距離を考慮することが重要である。
- 今後の課題は、廃物に関するより多くの環境負荷について検討した上で、インパクト評価まで行うこと、コンクリート用再生砕石の評価を行うことなどである。

謝辞：本研究を進めるにあたっては、多くの工場関係者の方々に多くの惜しめない御協力を頂いた。ここに記して深謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本開発銀行：調査第175号，建設廃棄物の発生量予測とその対応策～ストックから発生するスクラッ

- プ～，pp.12-13，1993.
- 2) 厚生省：産業廃棄物排出・処理状況調査報告書，平成6年度実績調査結果，p.21，1997.
 - 3) 建設省：建設リサイクル推進懇談会提言～建設リサイクル推進のあり方について，（財）先端建設技術センター，1996.
 - 4) 橋本征二，寺島泰：建築物の解体により発生する廃棄物量の将来予測，土木学会第34回環境工学研究フォーラム講演集，pp.109-111，1997.
 - 5) 橋本征二，小原卓巳，寺島泰：解体木くずリサイクルの環境面からの評価，土木学会論文集，No.643/VII-14，pp.37-48，2000.
 - 6) 建設省：平成7年度建設副産物実態調査結果について，1997.
 - 7) 岩淵省，松本亨，井村秀文：再生路盤材のライフサイクルアセスメント，環境システム研究，vol.24，pp.430-434，1996.
 - 8) CML：LCA 製品のライフサイクルアセスメント，サイエンスフォーラム，1994.
 - 9) （社）未踏科学技術協会，エコマテリアル研究会編：LCAのすべて～環境への負荷を評価する，工業調査会，pp.116-124，1995.
 - 10) 総務庁：平成二年産業連関表，（財）全国統計協会連合会，1994.
 - 11) 資源エネルギー庁：平成9年度版総合エネルギー統計，p.16，1998.
 - 12) 和田安彦，三浦浩之，中野加都子：LCAにおけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価手法とその適用，土木学会論文集，No.539/II-35，pp.155-165，1996.
 - 13) （社）プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書，pp.31-33，1993.

(1999.10.25 受付)

EVALUATION OF CONCRETE WASTE RECYCLING FROM ENVIRONMENTAL ASPECTS

Seiji HASHIMOTO, Hideto HIROIKE and Yutaka TERASHIMA

Concrete waste recycling as aggregate used for road construction was evaluated from environmental aspects. Conclusions are as follows: 1) recycling of concrete waste as aggregate used for road construction reduces not only waste but many other environmental loads, but this is not true in case that distance between demolition site and recycled aggregate production plant is longer than distance between demolition site and landfill site; 2) reduction of light oil use at preprocessing is mentioned as a method for further environmental load reductions, and as to emission reductions of CO₂, SO_x and NO_x, distance of transportation is important parameter.