

再生路盤材のライフサイクルアセスメント

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RECYCLED AGGREGATES

岩渕 省* 松本 亨* 井村秀文*
Akira IWABUCHI*, Tohru MATSUMOTO*, and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Objective of this study is to analyze the energy demand and the associated carbon emission pertinent to production of recycled aggregates used for road construction. The energy for operation of facilities to produce the aggregates, “direct energy”, is estimated by “parts-by-parts accounting” method. The energy pertinent to the production of these facilities themselves is obtained using the two different methods; the input-output model method and the “parts-by-parts accounting” method. This energy is divided by the depreciation term of the facilities and is accounted for the “indirect energy” of the aggregates production. The indirect energy calculated by the former method is slightly larger than that by the latter method. The total energy consumption (direct and indirect energy) and the related carbon emission at the production of a unit volume of recycled aggregates is 9.32 - 16.90 kcal/kg and 0.48 - 1.18 kg-C/ton, respectively. Those of the production of virgin aggregate are 5.0 kcal/kg and 0.32 kg-C/ton. The main cause which increases the energy consumption of the production of recycled aggregates is the process of removal of foreign substance.

KEYWORD: life cycle assessment(LCA), life cycle energy(LCE), life cycle CO₂ (LC-CO₂), recycled aggregates

1. はじめに

環境への負荷を減少させるには、資源のリサイクルが有効との考えがある。実際、リサイクルによって、バージン材の調達量は減り、それにともなう環境負荷は削減される。また、リサイクルによって、最終的に発生する廃棄物の量が削減できれば、最終処分のために必要な内陸や海面の埋立地は減り、その分だけは確かに環境への負荷が減少するはずである。しかし、リサイクルのための輸送や再生工程に新たに投入される資源・エネルギーの分まで考慮した場合に、リサイクル材の方がバージン材に比べて環境負荷が小さいとは単純に結論できない。

1990年度、全国で約44,500万トン排出された産業廃棄物のうち、建設廃棄物は約7,600万トンと推定されている。このように、建設廃棄物は各種産業廃棄物のなかでも発生量が大きく、その数字は急速に増加している¹⁾。とりわけ、建設廃棄物の中で最も大きな割合を占めているのはコンクリート塊である。全国的に廃棄物の最終処分場が不足しがちで、地域によっては処理費用がかなり高くなっていることもあり、処分されずに再生利用されるコンクリート塊の割合は増加しつつある。ここで、現在のところ、コンクリート塊の再生利用用途は再生路盤材としてがほとんどである²⁾。ただし、今後はコンクリート用骨材の入手が困難になると予想されることから、コンクリートとして再生可能な新しいタイプのコンクリートの開発が進むことも期待されている³⁾。

冒頭述べたように、コンクリート塊がリサイクルされれば、建設廃棄物の発生量は減少し、最終処分場の延命にはつながる。しかし、リサイクルにより新たに発生する環境負荷と、バージン材の生産

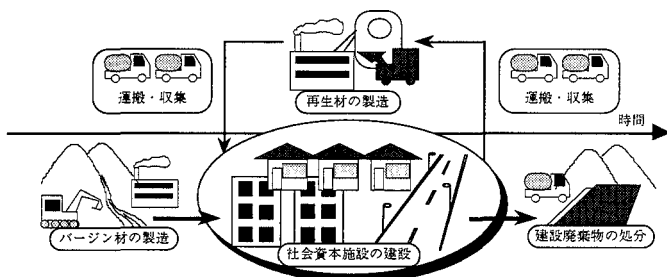


図1 建設骨材のライフサイクル

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

*Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

のために発生する環境負荷のどちらが大きいかは自明ではない。

本論文では、こうした問題認識に基づき、再生路盤材を対象としたLCA（ライフサイクルアセスメント）を行い、リサイクル材を利用することによる環境上の効果を分析する。ここで、環境負荷の評価項目としては、エネルギー消費量（LCE）及び二酸化炭素排出量（LC-CO₂）を指標とする。また、分析のレベルとしてはインベントリ分析の段階までとする（図1）。

2. 分析手法

現在実行されているLCAの代表的な手法としては、積み上げ計算による方法と産業連関分析による方法がある。しかし実際には、種々のデータ制約などのため、一方の方法だけで分析を完結させることは難しく、2つの方法を混合して使用することが多い。

本分析では、積み上げ法によって、コンクリート塊から再生路盤材を製造するための各工程ごとに、それぞれに投入される資材や作業による負荷を定量化し、それらの総和を全体の負荷とする。ここで、製造工程で用いられる機械等の製造にともなう負荷については、機械（鉄）の重量当たり原単位と、産業連関分析によって求めた価格（金額）当たり原単位の2つを用いて、両者による結果を比較検討する。

3. 再生路盤材原単位の算出

本研究ではコンクリート塊を再生骨材として、道路路盤に利用するものとして計算する。コンクリート再生材の用途は数種類に区分されるが（表1）、主な利用用途を再生クラッシャー及び再生粒度調整碎石の材料とした。

表1 再生骨材などとして利用する場合の区分と用途¹⁾

区分	用途
再生クラッシャー	道路舗装およびその他舗装の下層路盤材料 土木構造物の裏込材および基礎材 建築物の基礎材
再生コンクリート砂	工作物の埋戻し材料および基礎材
再生粒度調整碎石	その他舗装の上層路盤材料
再生セメント安定処理路盤材料	道路舗装およびその他舗装の路盤材料
再生石灰安定処理路盤材料	道路舗装およびその他舗装の路盤材料

注) 1. この表において「その他舗装」とは、駐車場の舗装および建築物の敷地内の舗装をいう。
2. 道路舗装に利用する場合においては、再生骨材等の強度、耐久性等の品質を特に確認のうえ利用するものとする。

再生のために実際に用いられるプラントや運転条件などは、工場によって大きく異なっている。これは、再生品に要求される品質が使用用途によって大きく異なっていることや、再生施設によってその規模・生産能力・立地条件等がかなり異なっているためである。このため、具体的な算定は、再生路盤材製造の代表的な工程を設定して行うこととし、「積算書による算出」と「業者ヒアリングに基づく算出」の2通りの方法で実行した。前者においては、コンクリート破碎処分単価表などの積算により、建設機械、燃料などの規格に応じてエネルギー使用量を積み上げて算出をした。後者では、福岡市内で営業している比較的生産能力の高い建設副産物処理業者を対象に、ヒアリング調査を行いデータを収集した。

3. 1 積算書による算出

ここで用いた積算書³⁾は、工事施工の実態に即して、適正な予定価格算出のために明示された基準である。本研究では、この積算書をもとに、コンクリート塊破碎処分単価表および再生製品製造の積算などを用いて、標準的な機械構成、製造量や再生施設の稼働時間などを求めた。これから標準的再生路盤材製造条件を設定し、コンクリート塊のリサイクルに投入されるエネルギーを求めた。算出範囲は、プラントにおけるコンクリート塊の再生プロセスのみを対象とし、建設廃材の発生現場における前処理、処理場までの輸送、製造した再生路盤材の運搬などの流通過程は含めなかった。プラント内での処理は、コンクリート塊の破碎分級作業および異物除去作業とそれ以後の再生製品の製造過程とに分けられるが、ここではそれぞれについて積算を行った（図2）。

3. 2 再生処理業者ヒアリングに基づく算出

福岡市内で営業していて、比較的生産量の大きい建設副産物処理業者1社を対象に選んで、ヒアリングを実施した。調査では、まず、使用機械等の施設の規模や運転時間、運転に使用されるエネルギー消費量および再生材製造量について、書面でデータの提供を依頼した。さらに、このデータについてヒアリングを行い、内容の確認をした。各データの数値は、1995年の年間を通じての平均的な値である。建設副産物を破碎プラント施設に投入するために使用される建設機械等については、運転時間や燃料消費量に関するデータの入手が困難なために、3.5m³ショベルローダ2台がプラント施設運転時間と同時間稼働したと仮定した。積算書による算出と同様、算出範囲はプラント施設の投入エネルギーに限定し、流通過程等については考慮しなかった。

4. 直接投入エネルギー

中間処理場は碎石工場と類似した設備を備え、磁選機や水槽等の異物除去施設が設置されている(図3)。古いコンクリートを解体したコンクリート塊は、まず圧碎機等により400mm程度に粗割りされ中間処理施設に搬入される。次に一次加工として200mm程度に破碎分級処理され、磁選機等により異物除去される。その後、二次加工により破碎し碎石化され、リサイクル路盤材として再生産される。

プラント施設や建設機械は、コンクリート塊破碎段階や再生路盤材の製造段階において、運転のために軽油や電力等の運転エネルギー(直接投入エネルギー)を必要とする。直接投入エネルギーの評価対象は、中央プラントにおける機械運転による投入量のみとして、積み上げて算出した。軽油は1ℓ=9,200kcal、電力は1kWh=2,250kcal(転換時のロスを考慮する)とした(表2)。

また、軽油や電力等のエネルギー投入にともない、二酸化炭素が排出される。直接投入エネルギーの評価対象と同様に、直接排出二酸化炭素も積み上げて算出した。軽油は1ℓ=0.779kg-C、電力は1kWh=0.129kg-Cとした(表3)。

5. 間接投入エネルギー

再生骨材製造段階において直接投入されるエネルギーのほかに、間接的に投入されるエネルギーとして、製造工程で使用される機械の製造エネルギーがある。具体的には、ショベルローダやプラント施設の機械の製造のために投入されるエネルギーを対象とする。建設機械の寿命は償却期間とし、使用機械のエネルギー原単位を建設機械等損料算定表に基づき次式により算出した：

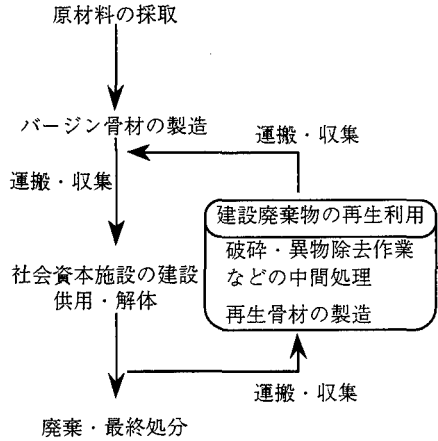


図2 再生骨材製造のフロー

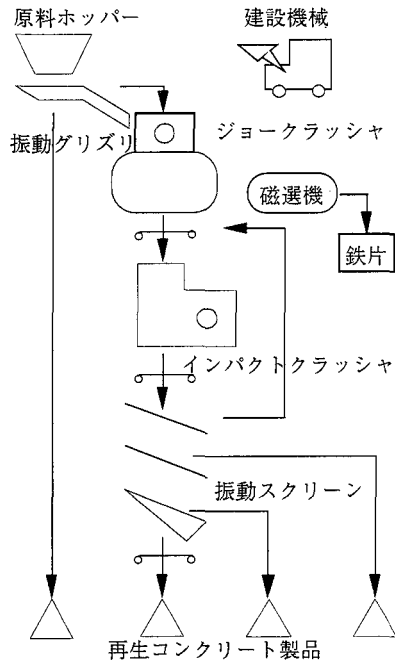


図3 再生コンクリート製品製造のフロー

表2 利用したエネルギー原単位

原単位利用項目	利用エネルギー消費原単位
電気使用量 ⁴⁾	「電力」→2,250 (kcal/kWh)
工業用水使用量 ⁵⁾	「上水道」→3,200 (kcal/m ³)
軽油使用量 ⁴⁾	「軽油」→9,200 (kcal/ℓ)
バージン路盤材 ⁶⁾	「採石」→5 (kcal/kg)
鉄 ⁶⁾	「鉄(粗鋼)」→5,657 (kcal/kg)
建設機械 ⁷⁾	「鉱山・土木建設機械」→1.14 (TOE/百万円)

表3 利用した二酸化炭素原単位

原単位利用項目	利用二酸化炭素原単位
電気使用量 ⁸⁾	「電力」→0.129(kg-C/kWh)
工業用水使用量	0 (kg-C/m ³)と近似
軽油使用量 ⁸⁾	「軽油」→0.779 (kg-C/ℓ)
バージン路盤材 ⁸⁾	「採石」→0.00032 (kg-C/kg)
鉄 ⁸⁾	「鉄(粗鋼)」→0.515 (kg-C/kg)
建設機械 ⁶⁾	「鉱山・土木建設機械」→0.83 (ton-C/百万円)

$$\epsilon = \frac{\text{建設機械の製造エネルギー} \times \text{運転1時間あたりの損料}}{\text{建設機械の基礎価格}}$$

プラント施設は複数の建設機械から構成されている。ここでは、施設全体を一つの建設機械と考えて、耐用年数7年、減価償却率90%としてエネルギー原単位を算出した。

建設機械の製造エネルギーは、産業連関表（183部門中の鉱山・土木建設機械部門）により求めた金額あたりのエネルギー原単位（1.14TOE/百万円）から求めた：

$$\text{建設機械の製造エネルギー} = \text{鉄の重量あたりのエネルギーの原単位} \times \text{機械重量}$$

また、建設機械は、その多くが鉄により構成されていることから、次式により機械重量をすべて鉄重量とみなすことによって建設機械の製造エネルギーを求めた。プラント施設を構成する一部の建設機械については、機械重量についてのデータを入手することができなかった。このため、入手可能な機械重量を基にしてその値を推定した。ただし、鉄の重量あたりのエネルギー原単位は5,657 (kcal/kg) とした。

2通りの手法により得られた機械の製造エネルギー原単位をもとに、再生路盤材製造のために間接投入される使用機械の製造エネルギー消費量を算出した。

間接投入エネルギー消費量と同様にして、建設機械の製造時に排出される二酸化炭素を求めた。ここでは、産業連関表（183部門中の鉱山・土木建設機械部門）により求めた金額あたりの二酸化炭素原単位=0.830 (ton-C/百万円) を用いた。また、鉄の重量あたりの二酸化炭素原単位=0.515 (kg-C/kg) を用いた。

6. LCE原単位の算出結果

6. 1 直接投入エネルギー

直接投入エネルギーのみについて、上記の2つの方法によって算出した結果を表4に示す。LCE及びLC-CO₂ともに、「積算書に基づく算出結果」は「業者ヒアリングに基づく算出結果」の約2倍と大きくなった。

表4 LCEおよびLC-CO₂原単位（直接投入のみ）

	リサイクル材	
	積算書に基づく結果	業者ヒアリングに基づく結果
エネルギー消費量 (kcal/kg)	12.48	6.03
二酸化炭素排出量 (kg-C/ton)	0.86	0.41

6. 2 全体エネルギー（直接投入エネルギープラス間接投入エネルギー）

①金額当たり原単位を用いて算出したの間接投入エネルギーを加えた算出結果を表5に示す。バージン材原単位との比較を行うと、リサイクル材原単位は2～3倍の値となっている。なお、ここで比較に用いたバージン材の原単位は酒井らの報告⁶⁾ ⁸⁾ によるものである。

②重量当たり原単位を用いて算出したの間接投入エネルギーを加えた算出結果を表6に示す。上記（2）の算出結果と比べると、LCE及びLC-CO₂ともに小さな値となっている。これは、金額換算の間接投入エネルギーに比べて、鉄重量換算の間接投入エネルギーが小さいためである。

7. まとめ

再生路盤材について、エネルギー消費量（LCE）及び二酸化炭素排出量（LC-CO₂）を評価指標としたLCA（ライフサイクルアセスメント）を行い、バージン材との比較を行った。

業者ヒアリングによる算出においては、処理業者のプラントにおいて得られたデータのみを用いて評価し

表5 LCEおよびLC-CO₂原単位（金額当たり）

	バージン材	リサイクル材	
		積算書に基づく算出	業者ヒアリングに基づく算出
エネルギー消費量 (kcal/kg)	5.0	16.90	7.90
二酸化炭素排出量 (kg-C/ton)	0.32	1.18	0.55

表6 LCEおよびLC-CO₂原単位（重量当たり）

	バージン材	リサイクル材	
		積算書に基づく算出	業者ヒアリングに基づく算出
エネルギー消費量 (kcal/kg)	5.0	14.07	6.71
二酸化炭素排出量 (kg-C/ton)	0.32	1.01	0.48

た。その結果は、積算書に基づく算出結果に比べて小さな値となっている。その理由としては、たまたまヒアリング対象に選定したプラント固有の特性が大きいものと考えられる。そのため他のプラントについても同様のデータを収集した上で比較検討することが必要である。このように業者ヒアリングでは、処理プラントの規模や生産量の大小によって値が異なることが考えられるため、一般的に採用できるLCAの原単位の値としては、積算書に基づく結果のほうがより適切であると考えられる。

いずれの結果においても、リサイクル材の原単位の方がバージン材より大きくなっている。これはコンクリート塊の破碎分級処理において、磁選機などによる異物除去作業にかなりのエネルギーが投入されるためである。

リサイクル材の製造に要するエネルギーをみる限りでは、バージン材より大きな値になっている。しかし、これだけで両者の優劣を結論することはできない。本論文で対象としたのは、材料製造のエネルギーのみであり、原材料の採取・輸送段階や最終処分段階で発生するその他の環境負荷因子をも考慮した総合的な評価が必要である。また、コストを考慮した比較評価も必要である。

参考文献

- 1) 建設省建設経済局建設業課：建設業と建設副産物対策, p93, 105, 1993
- 2) 日本開発銀行：建設系廃棄物の発生量予測とその対応策, 調査, Vol.175, p41-43, 1993
- 3) (財)建設物価調査会：建設副産物の再生・処理の積算, p132-146, p256-279, 1995
- 4) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー統計, 通商産業研究社 p16, 1995
- 5) 水道と地球環境を考える研究会：地球環境時代の水道, 技報堂出版株式会社, p109, 1993
- 6) 酒井寛二、漆崎昇：建設業の資源消費解析と環境負荷の推定, 環境情報科学, Vol.21, No.2, p133, 1992
- 7) 総務庁編：昭和60年産業連関表－計数編(2), 全国統計協会連合会, p771-782, 1989
- 8) 空調・衛生工学会 地球環境に関する委員会編：地球環境に関する委員会報告書, p130-133, 1995