

## コンクリートの環境影響の評価方法に関する研究

## ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGY OF CONCRETE

李 柱 国\*, 大久保 孝昭\*\*

Zhuguo LI and Takaaki OHKUBO

This study aims to develop an environmental impact assessment methodology for concrete. Firstly, we discussed the environmental burden factors of concrete, which should be considered and are able to be assessed, and their inventory methods, and proposed an integrated assessment method of environmental impacts for concrete. Then, 15 kinds of embodied energy and emission intensity data, and 9 types of environmental impact intensities ( $I_1$ ~ $I_9$ ) that consider different environmental burden factors were calculated for 36 kinds of raw materials of concrete, concrete mixing, and 5 types of transportation, by using Bottom-Up Method, and on basis of the modified version (LIME2) of LIME (Life-Cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling), respectively. Finally, the environmental impact indexes (EII) of 6 series of fly concrete were calculated by using 4 kinds of the environmental impact intensities ( $I_1$ ,  $I_6$ ,  $I_8$ ,  $I_9$ ). The calculating results show that (1) recycling does not always decrease the environmental impact of concrete, unless recycling method is suitable; (2) the EII using the  $I_6$  that integrates the environmental impacts of 15 kinds of burden factors, would rationally evaluate the environmental impact of concrete. However, the EII using the  $I_6$  that was obtained by subtracting the environmental burdens of recycled wastes' disposal can clearly reflect the environmental benefits of recycling.

**Keywords :** Concrete, Environmental impact intensity, Environmental benefit of recycling, Life cycle impact assessment, Land use change

コンクリート, 環境影響原単位, リサイクルの環境便益, ライフサイクルインパクトアセスメント, 土地利用変更

## 1. はじめに

コンクリートは、主要な建設材料として、人間がより豊かな生活を送るのに必要不可欠な材料である。世界のコンクリートの生産量は1990年の11.5億トンから2009年の28.0億トンへと2倍以上となっている<sup>1)</sup>。コンクリートの使用量は、その国の近代化のバロメータであるとも言われている。

コンクリートの不可欠な原材料であるセメントの生産過程では、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>以外に、原料起源のCO<sub>2</sub>(主原料である石灰石の熱分解により発生)の排出が避けられない。日本の場合、1トンのポルトランドセメントを製造するのに、約0.755トンのCO<sub>2</sub>を排出し、セメント産業からのCO<sub>2</sub>排出量は、全国の総排出量の約4%を占めている(2008年度)<sup>2)</sup>。このため、フライアッシュなどの混和材料および混合セメントの利用が拡大しつつある。また、日本では川砂・川砂利等の天然砂利の枯渇化および廃棄物最終処分場の不足に伴って、再生骨材およびスラグ骨材の大量使用が望まれており、使用量が増加している。将来的には、コンクリートは、廃棄物と副産物の“受け皿”になる必要があり、それは可能であると考えられる。

現在のコンクリートの調(配)合設計は、スランプやスランプフローで評価する流動性や、圧縮強度などの力学性能および中性化抵抗性、

凍結融解抵抗性などの耐久性能を確保することに主眼が置かれている。環境に配慮する環境性能が施工性能、安全性能および耐久性能と対等なレベルで設定される調合設計法、いわゆる環境配慮型調合設計法の確立が望まれている<sup>3)</sup>。このような調合設計法を実現するために、環境性能の評価方法を確立しておく必要がある。

一方、1998~2006年に実施されていたLCAプロジェクトによって、日本の環境条件と日本国民の環境思想を反映した被害算定型影響評価手法は開発された<sup>4)5)</sup>。日本版被害算定型影響評価手法(LIME)では、製品やサービスのライフサイクルインベントリ分析(LCI)で得られる各環境負荷項目の発生量(CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>など)を影響領域(地球温暖化、酸性化など)ごとに特性化し、カテゴリエンドポイント(発ガン、植物成長など)ごとに影響分析を行った上で、4つの保護対象(人間健康、社会資産、生物多様性および一次生産)の被害量を算定し、重み付け係数で4つの被害量を統合化して環境影響を単一指標で定量化する。LCAプロジェクトにおいて、自然科学的知見に基づいて、約1000の環境負荷項目の特性化係数と被害係数が開発された。被害係数は、環境負荷項目の単位量による保護対象の被害量である。被害係数を利用すると、各環境負荷項目の発生量より保護対象の被害量を推算できる。また、LCAプロジェクトでは、日本国民を対象と

\* 山口大学大学院理工学研究科情報・デザイン工学系専攻  
准教授・博士(工学)

\*\* 広島大学大学院工学研究科社会環境部門  
教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Information and Design Eng., Graduate School of Sci. and Eng.,  
Yamaguchi University, Dr.Eng.

Prof., Social Environmental and Space Division, Graduate School of Eng., Institute of  
Eng., Hiroshima University, Dr.Eng.

して保護対象の被害量を回避するための支払意思額に関するアンケート調査を行い、コンジョイント分析で保護対象の重み付け係数を得た。さらに、重み付け係数(支払意思額)に被害係数を乗じることで各環境負荷項目の統合化係数を算出した。統合化係数を利用すると、インベントリ分析の結果より環境影響を統合的に評価できる。ここに、保護対象の被害は環境影響(environmental impact)と称し、環境負荷項目の発生量を環境負荷と呼ぶことにして、両者を区別した。

LIME では、LCIA(life cycle impact assessment)の中に被害評価という新たなステップを組み込んでいる。被害評価の導入によって、環境影響の統合化は、各影響領域(地球温暖化など)の特性化結果の統合化に比べて、結果の信頼性と解釈の容易性が大きく向上した。また、LIME に選定されている4つの保護対象は、「人間社会」と「生態系」を維持するために保護すべき項目であると考えられる。このため、LIME による評価結果は、反映すべき社会環境と自然環境への影響を表すことになる。

筆者ら<sup>6)</sup>は、LIME に基づいたコンクリートの環境影響の評価方法について検討を行った。また、道正ら<sup>7)</sup>は、LIME を用いてコンクリート塊再利用の環境影響を評価した。これらの研究によって、LIME に基づいてコンクリートおよびコンクリート用材料の環境影響を合理的に評価しようと考えられる。しかし、コンクリートの環境影響を確実に評価し、リサイクル材利用の環境便益を正確に反映するためには、考慮すべき環境負荷項目はまだ明らかになっていない。

本研究では、コンクリートの環境性能の評価方法を提案するための先行研究として、まず考慮すべき環境負荷項目と各項目の定量化方法について考察し、インベントリ分析のシステム境界を検討し、LIME2(LIME の改良版)に基づいてコンクリートの環境影響評価方法を提案する。

次に、エネルギー資源消費量、CO<sub>2</sub>排出量、森林や海によるCO<sub>2</sub>固定量の減少、土地利用改変および廃棄物処分場の枯渇などの15種類の環境負荷項目を考慮して、インベントリ分析を行い、36種類のコンクリート用材料、5種類の輸送方法およびコンクリートの練混ぜの環境負荷原単位(embodied energy and emission intensity data)を計算する。ここに、環境負荷原単位は、単位量あたりの材料やプロセスのライフサイクルにおけるエネルギー消費量や汚染物の排出量である。また、環境影響の統合的評価を行い、エネルギー資源消費とCO<sub>2</sub>排出だけを考慮した場合、水圏汚染物の排出や土地利用改変を加味して評価した場合など、環境負荷項目の取り方を変えて9種類の環境影響原単位をそれぞれ算出する。この環境影響原単位は、単位量の材料製造や輸送による四つの保護対象の被害量の総和と指すものである。

さらに、砕石、加熱すりもみ方式で製造した再生粗骨材、3種類のセメントに対して、異なる環境負荷項目を考慮して得られた環境影響原単位を比べ、考慮すべき環境負荷項目を検討する。最後に、6シリーズのフライアッシュコンクリートの環境影響を評価し、用いた環境影響原単位の種類による評価結果の違いについて考察を行う。コンクリートの環境影響を適正に評価するために、考慮すべき環境負荷項目と使用すべき環境影響原単位を提案する。

## 2. 環境影響評価方法

### 2.1 環境負荷項目

コンクリートのライフサイクルでは、資源を消費し、大気、水圏および土壌に汚染物質や固形廃棄物を排出し、土地利用改変と森林や海

のCO<sub>2</sub>固定量の減少をもたらす。これらのことが、前述した4つの保護対象に悪影響を与えるため、環境影響評価の際にはこれらの環境負荷項目を考慮すべきであると考えられる。しかし、信頼できるインベントリデータを入手できるかどうかとの立場より、コンクリートの環境影響評価では、ほとんどCO<sub>2</sub>排出量とエネルギー消費量を対象とし、インベントリ分析を行う。この2項目だけを取り上げると、評価結果は、環境影響の一部しか反映せず、場合によって評価結果は現実から乖離してしまう。例えば、自然資源の枯渇と処分場の逼迫を緩和できるなどの効果を考慮すると、再生骨材の環境影響原単位は、天然骨材より小さいかもしれないが、CO<sub>2</sub>排出量とエネルギー消費量だけを評価すると、多くのエネルギーを消費する加熱すりもみ方式で製造される再生骨材の評価結果は天然骨材より大きくなる。

最近、廃棄物リサイクル量を環境負荷項目として考慮する提案がある<sup>3)</sup>。しかし、リサイクル材の製造は、バージン資源を節約する一方、エネルギーを消費し、CO<sub>2</sub>を排出するため、他の負荷項目と統合化する際に、リサイクル量数値の正負の取り扱いが問題となる。このため、廃棄物のリサイクル効果を反映するために、取り上げる環境負荷項目の設定は重要な課題である。

環境影響評価に考慮された環境負荷項目が多いほど、評価結果が環境影響の実際に近づく。しかし、インベントリデータの入手が困難であるため、評価できない環境負荷項目がある。本研究では考慮すべき、かつ評価可能な項目を以下のように抽出・整理することとした。

#### (1) 資源・エネルギーの消費

エネルギー資源が枯渇しているため、石油、石炭および天然ガスの消費を環境負荷項目とすべきである。電力消費量を電源構成によってこれらの資源消費量に換算する。LIME では、各エネルギー資源の統合化係数がそれぞれ与えられているため、本研究では石油、石炭および天然ガスの消費を4つの環境負荷項目を取り上げた。

骨材の粒形、粒度分布などから、コンクリート用骨材として、川砂・川砂利が最も好適であるが、日本では川砂・川砂利の枯渇問題が深刻になりつつある。また、海砂は近海では枯渇し、一部の地域ではその採取が禁止された。天然骨材の代替材として、砕石・砕砂の利用が近年に拡大されている。砕石と砕砂は、天然骨材に比べて品質の低下などの問題があるが、適切な対策を講じれば、天然骨材を用いたコンクリートと同等または近い品質を有するコンクリートを製造可能である。そこで、天然骨材の枯渇はコンクリートの生産に大きな問題をもたらさないとと思われる。また、LIME2 は、川砂・海砂などの天然骨材の資源消費に関わる統合化係数を与えていない。このため、天然骨材の資源枯渇を環境負荷項目として取り上げても、環境影響を推計できない。したがって、本研究では天然骨材の資源枯渇をコンクリートの環境負荷項目として取り上げないこととした。

#### (2) 大気への排出物

大気への排出物は、燃料の製造と使用時に排出する温室効果ガス(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)および大気汚染物質(SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん(PM))などを含む。これらの6種類の排出物は、地球や地域の環境を損傷するため、環境負荷項目として取り上げるべきである。

しかし、留意点として、燃料使用段階の大気汚染物の発生量は、燃焼機関および大気汚染防止設備の設置状況(例えば、脱硫、脱硝装置)によって異なるため、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>およびPMの排出量の実測値を用いるべきである。実測値がない場合は、燃料製造段階の排出分のみを

計上すると、評価結果は小さくなる問題が生じる。また、N<sub>2</sub>O と CH<sub>4</sub> の排出量の推計精度は高いとはいえない。

### (3) 水圏への排出物

水質を反映する主な指標として、生物化学的酸素消費量(BOD)、化学的酸素需要量(COD)、浮遊物質(SS)、全窒素(T-N)および全リンの量(T-P)は挙げられる。水中に酸素が足りないと、魚介類が生きられなくなる。BOD と COD の測定方法は異なるが、共に水中の溶存酸素量を反映するものである。COD は有機汚濁の指標としてよく用いられている。SS は魚類の生存と水中光合成の障害となる。T-N は農作物に対して大きな悪影響をもっている。T-P は富栄養化を促進する一因になり、生物の多様性を減少させる方向に作用する。したがって、BOD や COD、SS、T-P、T-N は、環境負荷項目として考慮する必要がある。ただし、BOD と SS の統合化係数は LIME2 に掲載されていないため、現在、COD、T-P および T-N を取り上げることができる。また、セメント、生コンクリートおよび骨材工場から排水する場合、COD、T-P および T-N の実測値を用いるべきである。実測値がなければ、材料製造に使用される電力と燃料の製造による水質汚濁物質の排出分のみを考慮するしかない。

### (4) 土地利用改変

土石、骨材などの採取および廃棄物の埋立ては、土地利用の改変を招く。廃棄物を再利用すれば、その埋立てによる土地利用の改変を避けられる。リサイクルの環境便益を反映するために、土地利用の改変を環境負荷項目とする必要がある。文献 5), 8) によって、日本では土石の採取、石炭の採掘および廃棄物埋立を行うための必要な敷地面積はそれぞれ 0.02m<sup>2</sup>/t、0.016m<sup>2</sup>/t および 0.20m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> である。

### (5) CO<sub>2</sub> 固定量の減少

日本では岩石・山砂・山砂利の採取および最終処分場建設が主に山間部で行われるため、森林の面積が減少する。森林の二酸化炭素の能力は、樹種、樹齢および地域によって異なる。日本の場合、樹種・樹齢ごとの CO<sub>2</sub> 固定能力を表 1 に示す。森林の炭素吸収量の平均値は、年間 1.4t/ha である (5.13t/ha の CO<sub>2</sub> に換算)。

文献 9) によって、骨材製造のための採石場面積は、日本全国では約 25187 ha で、年間骨材製造量は約 175 百万トンである(平成 22 年度)。土石の採取期間は、多くの場合はおよそ 20 年であり、森林の回復には 25 年を要する<sup>9)</sup>。本研究では採石期間を 20 年、その後の 25 年間で森林が形成されると想定し、合計 45 年間の CO<sub>2</sub> 固定量の減少を評価することにした。したがって、単位採石量あたりの消失森林面積は 0.072m<sup>2</sup>/t (=25187×104/(20×175×106)) であり、CO<sub>2</sub> 固定減少量は、1.66kg-CO<sub>2</sub>/t (=45×0.072×5.13×103/10000) である。この CO<sub>2</sub> 固定減少量を砕砂・砕石の製造、山砂・山砂利、陸砂・陸砂利の採取で森林や緑地の破壊による環境負荷とした。

一方、海の家草とプランクトンは CO<sub>2</sub> を吸収し、海底堆積物は有機炭素を固定する。海産骨材の採取は、海洋の CO<sub>2</sub> 固定能力を阻害する。海砂・海砂利の採取による CO<sub>2</sub> 固定量の減少は約 5.6kg-CO<sub>2</sub>/t である<sup>10)</sup>。現時点では、川砂・砂利の採取による CO<sub>2</sub> 固定量の減少量が不明であるため、海砂・海砂利と同じ値で評価することにした。

また、文献 11) は、調査結果により、日本では廃棄物の単位埋立容積あたりに失われる森林面積が 0.067m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> であることを明らかにしている。埋立場の遮水工の実績は 5~15 年であるため、埋立場の運用期間を 10 年、その後の 20 年間で樹林が形成されると想定して、

表 1 森林の年間炭素固定量(C-t/ha)

	20 年生前後	40 年生前後	60 年生前後	80 年生前後
杉	3.3	2.3	1.1	0.8
ヒノキ	3.1	2.0	1.1	0.3
天然林広葉樹	1.4	1.0	0.3	0.1

出典：(独)森林総合研究所 温暖化対応推進拠点ホームページ

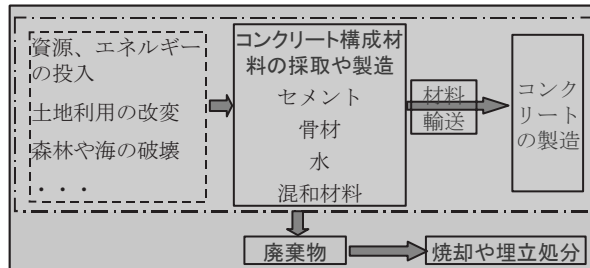


図 1 コンクリートの環境影響の評価範囲

合計 30 年間の CO<sub>2</sub> 固定量減少量を評価する。したがって、単位容積の廃棄物の埋立による CO<sub>2</sub> 固定量減少量は、1.03kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> である。

### (6) 廃棄物の埋立

固形廃棄物は埋め立てられると、重機使用、廃棄物からの有害物質排出および土地利用改変などによって環境影響が発生する。LIME2 に掲載されている廃棄物埋立の環境影響統合化係数は、土地利用と処分空間消失・逼迫の影響を考慮したものである。したがって、この統合化係数を利用した環境影響評価は不十分で、上記の(1)~(5)に示す環境負荷項目も考えて評価を行う必要がある。

## 2.2 インベントリ分析

### (1) 評価範囲

コンクリートのライフサイクルの環境影響は、原料の採取・製造からコンクリートの製造・供用を経て解体・処分までの各段階に生じたすべてのものである。しかし、コンクリートの供用期間は 65 年以上とすると、現在の技術で 65 年間に発生する維持管理を予測するのはほとんど不可能である。また、65 年後の解体・処分による環境影響を推定できない。65 年後の解体用機械や処分方法が現段階では予測できないためである。なお、コンクリートのポンプ圧送と振動打設によるエネルギー消費は、流動性だけではなく、打設部位や鉄筋量などにも依存するため、施工段階の環境影響を予測しにくい。

したがって、コンクリートの環境影響評価は、原材料の採取や製造から練混ぜまでのものを対象とすることにした (図 1 参照)。

### (2) 構成材料の環境負荷原単位

コンクリートのインベントリ分析を行うために、構成材料の環境負荷原単位 (構成材料の単位量あたりの CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> などの排出量) が必要である。産業関連表による砕石、砂利、セメントの環境負荷原単位は公表されているが、砂利とセメントの種類を区別せず、共通の環境負荷原単位が与えられている。このような原単位はマクロ的な評価に優れる反面、使用材料と調合が異なるコンクリートごとの評価が困難である。また、産業関連表の発行が 5 年ごとであるため、必ずしも現時点での環境負荷を評価しているものではない。

製造過程において実際に使用した原料と燃料より、積み上げ法で構成材料の環境負荷原単位を算定すれば、コンクリートごとの評価が可能となる反面、収集すべきデータが膨大となる欠点がある。また、

積み上げ法による環境負荷原単位の整備は以下の二つの困難に直面している。一つ目は、骨材および生コンなどの製造段階の環境負荷原単位は、生産設備稼働率によって異なることである<sup>12)</sup>。二つ目は、2.1節(2)に述べたように、セメント工場で脱硫・脱硝装置を使い、生コン工場排水処理を行っているため、原料と燃料の使用量より算出した汚染気体と水圏汚染物の排出量が実際の値と異なることである。

土木学会の刊行しているコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)は、製造過程における資源とエネルギーの投入量に基づいて17種類のコンクリート構成材料のCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの排出原単位を与えている<sup>13)</sup>。コンクリートの環境影響をより正確に評価するためには、2.1節に述べた15種類の環境負荷項目の原単位を整備する必要がある。また、コンクリートの環境影響を統合的に評価するには、各構成材料の環境影響原単位が必要となる。これらの原単位の整備方法と結果を第3章で詳しく記述する。

### 2.3 環境影響の統合化方法

環境負荷項目が同じであれば、コンクリートが異なっても、その評価値を比較できるが、異なる環境負荷項目の評価値を比べることが難しい。また、各項目の評価値しかないと、コンクリート間の環境影響を比較できない。したがって、さまざまな環境負荷項目の評価値を単一指標にまとめ、統合評価を行う必要がある。どの段階より統合化評価を実施するのかによって、統合化評価法は、Starting point 法、Middle point 法および End point 法に区分されている(図2参照)。そのうち、End point 法は、各アプローチでは最も合理的な手法であり、統合化の結果が解釈されやすいと考えられる。

統合評価を行うための環境負荷項目の重み付け方法は、社会的に合意された目標と現在の値との距離(差異)によって負荷項目の重み係数を設定する目標距離法、アンケート調査や専門家の知見などを基に、環境への影響を改善する優先順位を決定し、重み付け係数を設定するパネル法および環境への影響を金額で表示する外部費用法の3つに大別される。筆者<sup>14)</sup>は、目標距離法によってコンクリートの環境影響の統合評価を試みたが、この方法では目標値の設定は地

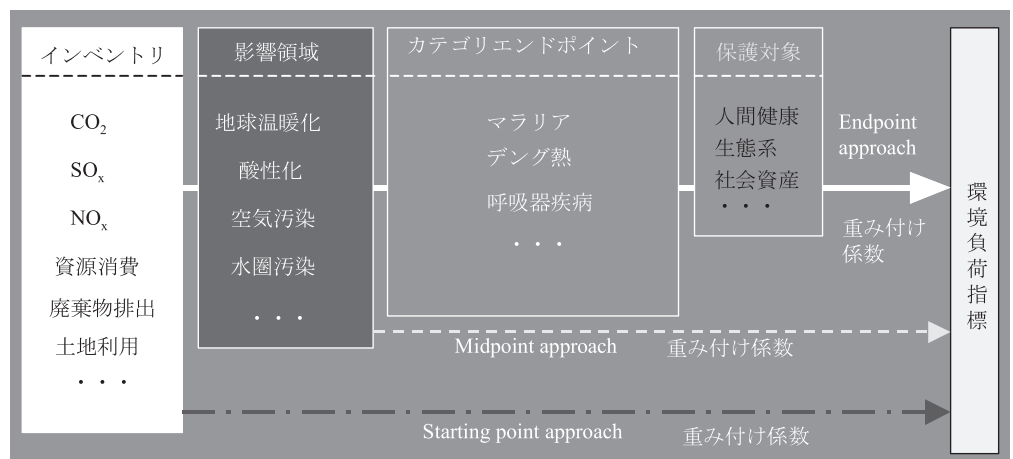


図2 環境負荷の統合化方法

域と時間によって異なり、重み付け係数は環境に与える影響に基づいたものではないため、統合評価結果の妥当性に疑問がある。また、パネル法による重み付け係数は、環境への影響を改善する優先順位によって決定されたものであるため、必ずしも環境影響の度合いを反映するわけではない。なお、土木学会・コンクリートの環境負荷評価研究小委員会<sup>3)</sup>は、コンクリート用材料のCO<sub>2</sub>排出量と廃棄物リサイクル量に環境ポイントをそれぞれ設定して、2項目の統合化方法を提案したが、環境ポイントの設定根拠が欠如している。

しかし、LIMEの改良版LIME2に与えられている各保護対象の重み付け係数は、LCAプロジェクトにおいて全国規模で無作為に抽出した約1000サンプルを対象とした面接調査の結果に基づいて開発されたため、日本の環境条件と日本国民の環境思想を反映し、社会的な合意が得られるものである。重み付け係数と被害係数の積でさらに求められた統合化係数も、日本国民の環境思想の代表性を確保している。したがって、本研究では、コンクリートの環境影響評価の際に、LIME2に与えられた統合化係数を利用することにした。2.1節に述べた環境負荷項目の統合化係数(2012年のデータ)<sup>9)</sup>を表2に示す。

### 2.4 環境影響の評価式

コンクリートの製造は、一次原材料(石灰石、骨材等)の採取、二次原材料(セメント、砕石等)の製造、輸送および練混ぜの一連のプロセスを含める。したがって、製造段階の環境影響指標(EII)は、式(1)で与えられる。

$$EII = \sum_m [(M_m \times I_{pm}) + (\frac{M_m}{1000} \times D_m) \times I_t] + I_{moc} \quad (1)$$

表2 LIME2に与えられる各環境負荷項目の環境影響統合化係数

環境負荷項目の カテゴリ	気体汚染物								水圏汚染物			枯渇性資源消費	生息地悪 化・減少	廃棄物排出		
	CO <sub>2</sub> (kg)	SO <sub>x</sub> (g) 点排出	NO <sub>x</sub> (g)		CH <sub>4</sub> (g)	N <sub>2</sub> O (g)	PM 2.5(g)		COD (g)	T-N (g)	T-P (g)	石油 (kg)	石炭 (kg)	天然 ガス (kg)	土地利用 改変(m <sup>2</sup> )	産業廃棄物の埋 立(kg)
統合化係数 (円/kg, g, m <sup>2</sup> )	2.77	4.07 <sup>1)</sup>	0.60 <sup>1)</sup>	1.93 <sup>1)</sup>	7.33 E-02	0.87	8.20	90.5	6.40 E-04	8.25 E-02	0.97	3.18	22.9	1.45	6.94E+4 <sup>2)</sup>	20.1 <sup>3)</sup> , 16.9 <sup>4)</sup> , 14.1 <sup>5)</sup> , 13.6 <sup>6)</sup> , 20.1 <sup>7)</sup> , 30.5 <sup>8)</sup>
標準偏差	1.64	7.46 <sup>1)</sup>	2.02 <sup>1)</sup>	14.68 <sup>1)</sup>	4.36 E-02	0.52	28.20	298.0	-	-	-	1.81	118.0	1.26	6.94E+5	12.2 <sup>3)</sup> , 9.7 <sup>4)</sup> , 8.3 <sup>5)</sup> , 9.5 <sup>6)</sup> , 14.3 <sup>7)</sup> , 27.0 <sup>8)</sup>

注：1) 酸性化と都市域大気汚染の統合化係数(全国平均)の和、2) 土石採掘の場合の値、3) 焼却灰、4) セメント固化物、5) 熔融スラグ、6) 鉱さい、7) ばいじん、8) 種類不明の産業廃棄物、9) 統合化係数は、水圏汚染物の負荷項目は代表値であるが、他の負荷項目は平均値である。

ここに、 $M_m$ :  $1\text{m}^3$ のコンクリートの製造に消費される原材料  $m$  の量 (kg)、 $D_m$ : 原材料  $m$  の輸送距離(km)、 $I_{pm}$ : 原材料  $m$  の製造による環境影響原単位(kg)、 $I_t$ : 輸送方法別の環境影響原単位( $\text{t}\cdot\text{km}$ )、 $I_{moc}$ : 練混ぜの環境影響原単位( $\text{m}^3$ )

コンクリート用材料、材料輸送および練混ぜの環境影響原単位( $I_{pm}$ ,  $I_t$ ,  $I_{moc}$ )は、それぞれの単位量の環境影響を指し、式(2)によって計算される。環境負荷項目別の統合化係数  $F_i$ は、LIME2 に掲載されている金銭単位のものを用いることにした(表 2 参照)。

廃棄物がコンクリート用材料にリサイクルされる場合は、その埋立や焼却処分が不要になり、処分による環境負荷は発生しなくなる。廃棄物利用の環境便益を  $E_{II}$  に反映するためには、利用された廃棄物の埋立や焼却等の処分を行う場合の環境負荷を式(3)に示すように減算して、コンクリート用材料のリサイクル環境便益考慮型環境影響原単位( $I_{pm}^*$ )も第 3 章では整備した。

$$I_{pm}, I_t, I_{moc} = \sum_i (\sum_j E_{ij}^v \times F_i) \quad (2)$$

$$I_{pm}^* = \sum_i [(\sum_j E_{ij}^v - \sum_r E_{ir}^w) \times F_i] \quad (3)$$

ここに、 $E_{ij}^v$ : 原材料  $j$  の採取や製造またはプロセス  $j$  による環境負荷項目  $i$  ( $\text{CO}_2$  等)の量、 $E_{ir}^w$ : 原材料の製造に使用された廃棄物  $r$  を処分する場合の環境負荷項目  $i$  の量、 $F_i$ : 環境負荷項目  $i$  の統合化係数

高炉スラグおよび廃コンクリート塊などの廃棄物や副産物は、他製品の原料や多用途で活用されているが、100%のリサイクル率には達しておらず、またライフサイクルの観点で考えると、どんな方法でリサイクルしても、それらの埋立処分を回避することに貢献できる。したがって、コンクリートにリサイクルされる廃棄物や副産物は多製品や他分野で利用されていっても、式(3)の減算は合理的であると考えられる。

式(2)や式(3)によって得られた環境影響原単位は、単位量の原材料やプロセスの環境影響による外部コストとなる。こんな環境影響原単位を用いると、式(1)による環境影響の評価結果はコンクリートの外部コストとなり、トータルコスト(外部コスト+通常のコスト)でリサイクル材利用の採算性を評価しようと考えられる。

### 3. 環境負荷原単位と環境影響原単位の整備

#### 3.1 環境負荷原単位

資源とエネルギーの投入および負荷物質の排出などを含めたインベントリデータは、構成材料の製造者によって異なり、入手困難なことも多く、入手できたとしてもそれらの確かさを検証できないケースもある。本研究では、土木学会の刊行しているコンクリート構造物の環境性能照査指針<sup>13)</sup>および公表されている文献に掲載されている各構成材料の製造段階における資源とエネルギーの消費量を環境負荷原単位の整備に利用した。構成材料の資源とエネルギーの投入量を表 3 に示す。生コンクリート練混ぜ時の電力消費量は  $5.568\text{kWh}/\text{m}^3$  とした<sup>15)</sup>。なお、トラック輸送の軽油消費量は参考文献 13) に掲載されているものを用いた。表 4 に示す各種エネルギーの環境負荷原単位を用いて、36 種のコンクリート用材料、練混ぜおよび 5 種類の輸送方法の環境負荷原単位を算定した。また、廃棄物や副産物を利用して製造したコンクリート用材料のリサイクル環境便益考

慮型環境負荷原単位も算定した。紙環境負荷原単位は、表 4 に示す 14 種類とエネルギー消費量の合計 15 種類を含む。紙面の都合でここにこれらのデータを記述しない。

電力などのエネルギーの環境負荷原単位および材料の製造のための資源・エネルギーの消費量と汚染物排出量はよく変動している。表 3 と表 4 に示す各数値の年代はデータが最初に文献に掲載された時期である。一部は、現状を正確に反映しないかもしれないが、コンクリートの環境影響の合理的な評価方法の検討を主目的としている本研究ではこれらのデータが暫定的に使った。最新のデータの調査とデータベースの更新は今後の課題としたい。

#### 3.2 環境影響原単位

環境影響原単位は、考慮した環境負荷項目によって異なる。本研究では、整備した環境負荷原単位および表 2 に示す統合化係数によって 9 種類の環境影響原単位を表 5 と表 6 に示すように求めた。各種種類の環境影響原単位が考慮した環境負荷項目を表 7 に示す。 $I_1 \sim I_6$  の算出は式(2)によって、構成材料の製造に利用された廃棄物が処分される場合の環境影響を減算した  $I_7 \sim I_9$  の算出は式(3)によってそれぞれ行われた。水、川砂、碎石などのバージン材料、トラック輸送および練混ぜの場合は、廃棄物の利用がないため、 $I_7 \sim I_9$  の値は  $I_6$  と同じである。

図 3 に碎石の環境影響原単位を示す。同図に示すように、考慮した環境負荷項目が多いほど、環境影響原単位は大きくなるが、土地利用改変を評価項目とした場合の環境影響原単位は大幅に増大した。これは、日本の国土面積が狭小で、土地利用改変の環境影響が大きく評価され、LIME2 に与えられた統合化係数が大きいためである。 $I_1$  はそれぞれ  $I_5$  と  $I_6$  の 14% と 1% 程度である。この結果によって、 $\text{CO}_2$  とエネルギー消費のみを取り上げて環境影響を評価するのは不十分であることがわかった。

図 4 は、加熱すりもみ方式で製造した再生粗骨材(H-RCA)の環境影響原単位を示したものである。 $I_1 \sim I_6$  の値を見ると、考慮した環境負荷項目が多いほど、環境影響原単位は大きい。しかし、H-RCA の製造に使われた廃コンクリートを埋め立てる場合に生じる環境影響を減算すると、環境影響原単位は小さくなるのが認められた ( $I_7 \sim I_9$  の値を参照)。特に、廃コンクリートの埋立による土地利用改変の環境影響を減算した  $I_8$  は負値に転じた。また、廃棄物の埋立による最終処分場枯渇も考慮した  $I_9$  の値は大幅に減少した。これは、日本では廃棄物の最終処分場が不足しており、廃棄物の埋立による環境影響が大きく評価されているためである。リサイクル材の環境影響原単位は、廃棄物の埋立による環境影響を減算することで負値になり、廃棄物や副産物のリサイクルの環境保全効果を適正に表現できるようになる。

図 3 と図 4 によれば、土地利用変化による環境影響を考慮しない  $I_1 \sim I_5$  は、碎石と H-RCA では H-RCA のほうが大きい。これは、H-RCA の製造に碎石より多量なエネルギーが消費されるためである。 $I_1 \sim I_5$  のいずれを利用して再生骨材コンクリートの環境影響を評価すると、碎石を用いたコンクリートの評価結果より大きくなり、再生骨材利用の環境保全効果を反映できない。したがって、廃棄物や副産物による骨材および混和材料の環境影響を正確に評価するためには、土地利用改変を環境負荷項目として取り上げる必要がある。

3 種類のセメントの環境影響原単位を図 5 に示す。同図に示すように、廃棄物の利用量は最も多い高炉セメントの環境影響原単位が最も小さい。廃棄物の埋立による土地利用改変の環境影響を減算した

表3 構成材料の製造時のエネルギーおよび資源投入量(1)

構成材料名	エネルギーと資源投入	出典とデータの最初時期	説明およびインベントリ分析時の取扱い
上水道水(kg)	電力 4.88E-04 kWh, 灯油 7.34E-08 kg, ガソリン 1.34E-07 kg, LPG 1.05E-08 kg, 都市ガス 2.26E-06 m <sup>3</sup> , 天然ガス 5.04E-10 kg	文献 16) 2012 年	・温室効果ガス、大気汚染気体(2000 年のデータ) <sup>17)</sup> ・水圏排出物(2000 年のデータ) <sup>17)</sup> ・埋立廃棄物(2012 年のデータ) <sup>16)</sup> ・ばいじん：電力消費量による計算値
普通ポルトランドセメント(kg)	電力 0.0316 kWh, 石炭 0.094 kg, 石油 コークス 0.015 kg, C 重油 0.0024 lit, 石 灰石・珪石 1.19 kg, 粘土 0.046kg, 廃棄 物焼却 0.012kg, 廃棄物利用 0.137kg	文献 4) 2004 年	・水圏排出物はエネルギー消費量による計算値である。それ以外の排出は参考文献 <sup>4)</sup> による(2004 年のデータ)。 ・エネルギー資源消費量、廃棄物焼却量および埋立廃棄物量は、左記の投入量によるものである。
フライアッシュセメント	電力 0.0222kWh, 石炭 0.075kg, 石油コ ークス 0.00887kg, C 重油 0.0019lit, 石灰 石・珪石 0.68kg, 粘土 0.026kg, 廃棄物 焼却 0.0067kg, 廃棄物利用 0.283kg		
高炉セメント	電力 0.0216kWh, 石炭 0.055kg, 石油コ ークス 0.012kg, C 重油 0.0017lit, 石灰 石・珪石 1.02kg, 粘土 0.037kg, 廃棄物 焼却 0.01kg, 廃棄物利用 0.493kg		
砕石(t)	電力 4.3 kWh, 軽油 0.366 kg	文献 13) 1975 年	採石の土地利用改変と森林 CO <sub>2</sub> 固定損失を考慮した。
砕砂(t)	電力 6.2 kWh, 軽油 0.366 kg		
山砂・山砂利、陸砂・陸砂利 (m <sup>3</sup> )	電力 0.18 kWh, 軽油 0.74 lit	文献 4) 2004 年	・現場計量の砂と砂利の単位容積質量をそれぞれ 1330 kg/m <sup>3</sup> と 1570kg/m <sup>3</sup> とし、2 種類の骨材 kg あたりのエネルギー消費量を計算した。 ・山・陸産骨材採取の土地利用改変と森林 CO <sub>2</sub> 固定損失を考慮した。 ・海産骨材採取による海洋 CO <sub>2</sub> 固定の損失を考慮した。
海砂・海砂利	電力 0.18 kWh, C 重油 0.123 kg, A 重油 0.075 kg/m <sup>3</sup>		
川砂・川砂利	-		
フライアッシュ (kg)	II 種：電力 0.126 kWh (0.453 MJ)	文献 3), 1992 年	・フライアッシュ JIS I 種と II 種の比表面積の実績値は、それぞれ 6000cm <sup>2</sup> /g と 3500cm <sup>2</sup> /g 前後であるため、JIS I 種の分級の電力消費量は、JIS II 種の 1.7 倍とした。 ・分級を殆どしない VI 種の電力消費はゼロとした。
	I 種：電力 0.214 kWh	-	
	VI 種：電力 0 kWh	-	
シリカフェーム(kg)	5.39 kWh (=0.126*15000/3500)	-	シリカフェームの比表面積は 15000~20000cm <sup>2</sup> /g である。その収集に必要な電力は不明であるため、比表面積は 3500cm <sup>2</sup> /g 前後の JISII 種のフライアッシュの分級に要する電力を参照して電力消費量を参考値として推算した。
高炉スラグ微粉末(kg)	4000 cm <sup>2</sup> /g	電力 0.17 kWh	文献 3), 1991 年
	6000 cm <sup>2</sup> /g	電力 0.23 kWh	-
	8000 cm <sup>2</sup> /g	電力 0.31 kWh	-
石灰石微粉末(kg)	比表面積 5000 cm <sup>2</sup> /g 電力 0.0368 kWh, 軽油 0.0168 MJ	文献 13), 2000 年	
再生粗骨材 L(kg) 現場外破碎	電力 0.00744kWh, 軽油 0.00611MJ	文献 18), 2000 年	0.8t の再生粗骨材を製造するため、1.25t の廃コンクリートの埋立処分が回避できる。
再生粗骨材 L(kg) 現場内破碎	軽油 0.0588 MJ		1t の廃コンクリートで 1t の再生粗骨材を製造するため、1t 廃コンクリートの埋立処分が回避できる。
再生粗骨材 H(kg) スクリュー摩擦方式	電力 0.0249 kWh, 軽油 0.0136 MJ		1t の廃コンクリートで 0.56t の再生粗骨材を製造するため、1.79t の廃コンクリートの埋立処分が回避できる。
再生粗骨材 H(kg) 加熱すりもみ方式	電力 0.0240 kWh, 軽油 0.3070 MJ		・ 1t の廃コンクリートの処理には電力 29kWh と軽油 9.7lit が消費される。 ・ 1t の廃コンクリートで 0.35t の再生粗骨材と 0.30t の再生細骨材をそれぞれ製造する。
再生細骨材 H(kg) 加熱すりもみ方式	電力 0.0206 kWh, 軽油 0.3070 MJ		・ 1t の再生粗骨材と再生細骨材の製造はそれぞれ 0.538t と 0.462t の廃コンクリートの埋立処分が回避できる。
ごみスラグ骨材(kg), 燃料式	電力 0.24 kWh, 重油 0.793 lit	文献 3), 1988 年	1t のごみスラグ骨材を製造することによって 1238kg の廃棄物埋立処分が避けられる。
ごみスラグ骨材(kg), 電気式	電力 0.959 kWh, 重油 0.0144 lit		
高炉スラグ粗骨材(kg), 徐冷	電力 0.0142 kWh	文献 13), 2001 年	1t の高炉スラグ骨材を製造することによって 1t の廃棄物埋立処分が避けられる。
高炉スラグ細骨材(kg), 水砕	電力 0 kWh		
高炉スラグ粗骨材(kg), 転炉・徐冷	電力 0.0134 kWh		

表3 構成材料の製造時のエネルギーおよび資源投入(kgあたり)(2)

構成材料名	エネルギーと資源投入	出典とデータの最初載録時期	説明およびインベントリ分析時の取扱い
銅スラグ細骨材	電力 0.000116 kWh	文献 13) 2001 年	1t の高炉スラグ骨材を製造することによって 1t の廃棄物埋立処分を避けられる。
フェロニッケルスラグ粗骨材	電力 0.0156 kWh		
フェロニッケルスラグ細骨材	電力 0.000116 kWh	-	銅スラグ細骨材の製造の電力消費量が不明である。水砕や風砕で作られるため、銅スラグ細骨材の電力消費量を参照して設定した。
電気酸化炉スラグ粗骨材(徐冷)	電力 0.0142 kWh	-	製造方法は徐冷型高炉スラグ粗骨材と同じであるため、徐冷型高炉スラグ粗骨材の電力消費量を参照して設定した。
電気酸化炉スラグ細骨材(水砕)	電力 0 kWh	-	製造方法は水砕型高炉スラグ細骨材と同じであるため、水砕型高炉スラグ細骨材の電力消費量を参照して設定した。
減水剤(リグニン系)	電力 0.348 kWh	文献 13) 2005 年	文献 13)は、CO2 排出量のみを与えている。エネルギー種類と消費量は不明である。便宜上、CO2 排出量のすべてを電力消費によるものとして、電力消費量を換算した。
高性能減水剤(ポリカルボン酸系)	電力 0.425 kWh		
粘土製人工軽量骨材	電力 0.120 kWh, 灯油 0.192 MJ, 粘土質原料 1.282kg	調査結果 2004 年	

表4 各種エネルギーと廃棄物処理の環境負荷単位

エネルギー種類 廃棄物処分	単位(*)	エネルギー (MJ/*)	CO <sub>2</sub> (kg/*)	SO <sub>x</sub> (g/*)	NO <sub>x</sub> (g/*)	CH <sub>4</sub> (g/*)	N <sub>2</sub> O (g/*)	PM (g/*)	COD (g/*)	T-N (g/*)	T-P (g/*)	廃棄物 (kg/*)	原油 (kg/*)	石炭 (kg/*)	天然ガス (kg/*)
電力	kWh	9.750	3.530 E-01	1.400 E-01	1.800 E-01	0.000	2.100 E-03	7.400 E-03	1.500 E-04	5.100 E-03	7.000 E-04	2.700 E-03	2.601 E-02	5.721 E-02	6.935 E-03
軽油	MJ	1.155	7.800 E-02	1.140 E-01	5.170 E-01	5.000 E-03	3.160 E-03	点源 5.262E-02 線源 4.346E-02	3.456 E-04	3.352 E-04	2.599 E-05	1.273 E-04	2.194 E-02	7.278 E-06	3.433 E-04
石炭	kg	2.579 E+01	2.409	2.500	6.000	4.150 E-01	3.610 E-01	2.300 E+00	2.310 E-06	7.854 E-05	1.078 E-05	4.158 E-05	4.301 E-03	1.002	5.808 E-04
石油コークス	kg	3.560 E+01	3.633	4.400	5.930 E-01	3.390 E-02	8.940 E-02	1.070 E-02	3.495 E-06	1.188 E-04	1.631 E-05	6.291 E-05	9.998 E-01	1.333 E-03	1.075 E-04
A重油	L	3.910 E+01	2.893	7.625	6.100	2.737 E-01	0.000	5.550 E-04	1.125 E-05	3.825 E-04	5.250 E-05	2.025 E-04	8.700 E-01	2.880 E-04	1.360 E-02
C重油	L	4.170 E+01	3.090	2.248 E+01	5.233	3.140 E-01	6.150 E-01	8.330 E-01	1.125 E-05	3.825 E-04	5.250 E-05	2.025 E-04	8.700 E-01	2.880 E-04	1.360 E-02
灯油	MJ	1.067	7.100 E-02	2.500 E-02	9.300 E-02	1.000 E-03	0.000	6.842 E-07	8.808 E-06	2.995 E-04	4.110 E-05	1.817 E-07	3.401 E-02	3.849 E-06	5.252 E-04
廃プラスチック焼却	kg	3.021 E-01	2.640	5.440 E-01	1.220	2.025 E-04	1.705 E-01	1.060 E-01	9.722 E-04	6.090 E-03	8.312 E-04	1.550 E-01	1.300 E-03	1.625 E-03	2.057 E-04
廃棄物埋立	kg	5.721 E-01	2.073 E-02	8.275 E-03	1.087 E-02	3.100 E-06	1.250 E-04	4.663 E-04	9.290 E-02	1.110 E-02	2.060 E-04	0.000	1.538 E-03	3.353 E-03	4.066 E-04

[注] 各原単位の出典：

- 電力の水圏排出物(1990年)と廃棄物(1992年)<sup>17)</sup>、それら以外の原単位(2004年)<sup>4)</sup>
- 軽油の温室効果気体・SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub>(2005年)<sup>19)</sup>、ばいじん(2002年)<sup>13)</sup>、水圏排出物(2000年)<sup>17)</sup>、エネルギー資源消費(2013年)<sup>21)</sup>
- 石炭の温室効果気体・大気汚染物・エネルギー資源消費(2013年)<sup>21)</sup>、水圏排出物は電力消費量<sup>21)</sup>による計算値
- 石油コークスの温室効果気体・SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub>・エネルギー資源消費(2013年)<sup>21)</sup>、水圏排出物は電力消費量による計算値
- A重油の温室効果気体・SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub>(2005年)<sup>19)</sup>、エネルギー資源消費(2013年)<sup>21)</sup>、ばいじん・水圏汚染物・廃棄物：電力消費量<sup>21)</sup>による計算値
- C重油のエネルギー・CO<sub>2</sub>・SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub>(2005年)<sup>19)</sup>、エネルギー資源消費・CH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>O・ばいじん(2013年)<sup>21)</sup>、水圏汚染物・廃棄物は電力消費量<sup>21)</sup>による算出値
- 灯油の温室効果気体・大気汚染物(2005年)<sup>19)</sup>、ばいじん・廃棄物・エネルギー資源消費(2013年)<sup>21)</sup>、水圏排出物は電力消費量<sup>21)</sup>による計算値
- プラスチック焼却の水圏汚染物(2000年)<sup>20)</sup>とエネルギー資源消費量(2004年)<sup>4)</sup>、その他は電力とA重油の消費量<sup>4)</sup>による計算値
- 廃棄物埋立の水圏排出物(2004年)<sup>4)</sup>、その他はエネルギー消費量<sup>4)</sup>による計算値

I<sub>8</sub>はI<sub>1</sub>~I<sub>7</sub>より大幅に減少し、最終処分場枯渇の影響も減算したI<sub>9</sub>は、フライアッシュセメントと高炉セメントの場合には負値になった。つまり、廃棄物を大量に利用したフライアッシュセメントと高炉セメントは、土地利用改変の減少と最終処分場枯渇の緩和に貢献できるものである。

#### 4. コンクリートの環境影響の評価例

##### 4.1 コンクリートの調査

6 シリーズのフライアッシュ(FA)を用いたコンクリートの調査と性能試験値を、文献 22, 23)より表 8 に記述する。JIS I 種、JIS II 種お

よび JIS IV 種の FA の密度はそれぞれ 2.40, 2.33 および 2.20g/cm<sup>3</sup> で、比表面積はそれぞれ 5530, 3740 および 1770 cm<sup>2</sup>/g であった。セメント、細骨材、粗骨材および混和材料(フライアッシュと化学混和剤)が 10t ディーゼルトラックで輸送され、輸送距離がそれぞれ 100m、41m、46m および 150km と想定した。

##### 4.2 評価結果および考察

各構成材料の環境影響原単位 I<sub>1</sub>, I<sub>6</sub>, I<sub>8</sub>, I<sub>9</sub> を用いて、式(1)によって 6 シリーズのコンクリートの環境影響指数 EII を計算した。I<sub>1</sub>, I<sub>6</sub>, I<sub>8</sub>, I<sub>9</sub> を用いた環境影響指数 EII の計算結果をそれぞれ EII-1, EII-6, EII-8, EII-9 と記することにした。計算結果を図 6 に示す。

表5 構成材料の環境影響原単位 (kg あたり) (1)

環境影響原単位の種類	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>
構成材料									
普通セメント	4.434E+00	4.439E+00	6.084E+00	6.087E+00	6.093E+00	7.850E+00	7.692E+00	6.557E+00	3.454E+00
フライアッシュセメント	3.585E+00	3.588E+00	4.907E+00	4.909E+00	4.914E+00	6.416E+00	6.253E+00	3.929E+00	-2.423E+00
高炉セメント	2.599E+00	2.602E+00	3.596E+00	3.598E+00	3.602E+00	4.608E+00	4.439E+00	4.070E-01	-1.062E+01
フライアッシュ (JIS I種)	3.895E-01	3.898E-01	5.107E-01	5.243E-01	5.243E-01	5.305E-01	3.455E-01	-7.823E+00	-3.016E+01
フライアッシュ (JIS II種)	2.995E-01	2.998E-01	3.927E-01	4.032E-01	4.032E-01	4.079E-01	2.229E-01	-7.945E+00	-3.028E+01
フライアッシュ (JIS VI種)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.850E-01	-8.351E+00	-3.069E+01
シリカフェーム	1.283E+01	1.284E+01	1.682E+01	1.727E+01	1.727E+01	1.748E+01	1.729E+01	6.232E+00	-1.321E+01
高炉スラグ微粉末 (4000)	4.041E-01	4.044E-01	5.298E-01	5.440E-01	5.440E-01	5.503E-01	3.653E-01	-6.579E+00	-3.014E+01
高炉スラグ微粉末 (6000)	5.511E-01	5.515E-01	7.224E-01	7.418E-01	7.418E-01	7.504E-01	5.654E-01	-6.380E+00	-2.994E+01
高炉スラグ微粉末 (8000)	7.347E-01	7.352E-01	9.631E-01	9.889E-01	9.889E-01	1.000E+00	8.155E-01	-6.132E+00	-2.969E+01
再生粗骨材 L (現場外破碎)	1.946E-02	1.949E-02	3.236E-02	3.300E-02	3.300E-02	3.329E-02	-1.980E-01	-1.041E+01	-3.833E+01
再生粗骨材 L (現場破碎)	1.683E-02	1.702E-02	8.785E-02	8.808E-02	8.808E-02	8.819E-02	-9.681E-02	-8.263E+00	-3.060E+01
再生粗骨材 H (スクリー・摩砕方式)	6.310E-02	6.318E-02	9.799E-02	1.001E-01	1.001E-01	1.011E-01	-2.293E-01	-1.481E+01	-5.470E+01
再生粗骨材 H (加熱すりもみ方式)	1.510E-01	1.511E-01	2.172E-01	2.192E-01	2.192E-01	2.201E-01	1.205E-01	-4.273E+00	-1.629E+01
再生細骨材 H (加熱すりもみ方式)	7.099E-02	7.097E-02	1.203E-01	1.212E-01	1.212E-01	1.219E-01	3.648E-02	-3.737E+00	-1.406E+01
ごみスラグ骨材 (燃料式)	9.577E+00	1.002E+01	9.070E+01	9.072E+01	9.072E+01	9.073E+01	9.050E+01	8.039E+01	5.274E+01
ごみスラグ骨材 (電気式)	2.448E+00	2.457E+00	4.627E+00	4.707E+00	4.707E+00	4.743E+00	4.514E+00	-5.611E+00	-3.325E+01
高炉スラグ粗骨材 (徐冷)	3.381E-02	3.383E-02	4.432E-02	4.550E-02	4.550E-02	4.604E-02	4.604E-02	-1.006E+01	4.356E-02
高炉スラグ細骨材 (水砕)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.850E-01	-7.378E+00	-3.069E+01
高炉スラグ粗骨材 (転炉・徐冷)	3.184E-02	3.186E-02	4.174E-02	4.286E-02	4.286E-02	4.336E-02	-1.416E-01	-7.335E+00	-3.064E+01
銅スラグ細骨材	2.769E-04	2.771E-04	3.630E-04	3.727E-04	3.727E-04	3.771E-04	-1.846E-01	-7.378E+00	-3.069E+01
フェロニッケルスラグ粗骨材	3.710E-02	3.713E-02	4.864E-02	4.994E-02	4.994E-02	5.052E-02	-1.345E-01	-7.328E+00	-3.064E+01
フェロニッケルスラグ細骨材	2.769E-04	2.771E-04	3.630E-04	3.727E-04	3.727E-04	3.771E-04	-1.846E-01	-7.378E+00	-3.069E+01
電気酸化炉スラグ粗骨材 (徐冷)	3.381E-02	3.384E-02	4.433E-02	4.551E-02	4.551E-02	4.604E-02	-1.390E-01	-7.332E+00	-3.064E+01
電気酸化炉スラグ細骨材 (水砕)	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-1.850E-01	-7.378E+00	-3.069E+01

表5 構成材料の環境影響原単位 (kg あたり) (2)

環境影響原単位の種類	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>
構成材料									
水道水	3.477E-03	3.578E-03	9.381E-03	1.101E-02	1.101E-02	1.175E-02	1.175E-02	1.175E-02	1.175E-02
碎石	1.507E-02	1.513E-02	3.861E-02	1.033E-01	1.079E-01	1.543E+00	1.543E+00	1.543E+00	1.543E+00
砕砂	1.959E-02	1.965E-02	4.454E-02	1.093E-01	1.139E-01	1.549E+00	1.549E+00	1.549E+00	1.549E+00
山/陸砂利	6.526E-03	6.595E-03	3.303E-02	3.313E-02	3.772E-02	1.426E+00	1.426E+00	1.426E+00	1.426E+00
山/陸砂	7.714E-03	7.795E-03	3.900E-02	3.911E-02	4.371E-02	1.432E+00	1.432E+00	1.432E+00	1.432E+00
川・海-砂利	1.835E-03	1.883E-03	1.246E-02	1.247E-02	2.798E-02	2.799E-02	2.799E-02	2.799E-02	2.799E-02
川・海-砂	2.168E-03	2.225E-03	1.472E-02	1.473E-02	3.024E-02	3.025E-02	3.025E-02	3.025E-02	3.025E-02
石灰石粉末 (5000cm <sup>2</sup> /g)	9.245E-02	9.257E-02	1.401E-01	1.432E-01	1.478E-01	1.537E+00	1.537E+00	1.537E+00	1.537E+00
減水剤 (リグニン系)	8.295E-01	8.302E-01	1.087E+00	1.117E+00	1.117E+00	1.130E+00	1.130E+00	1.130E+00	1.130E+00
高性能減水剤(ポリカルボン酸系)	1.012E+00	1.012E+00	1.326E+00	1.362E+00	1.362E+00	1.378E+00	1.378E+00	1.378E+00	1.378E+00
粘土製人工軽量骨材	3.435E-01	3.437E-01	4.623E-01	4.723E-01	4.782E-01	2.263E+00	2.263E+00	2.263E+00	2.263E+00

表6 練混ぜとトラック輸送の環境影響原単位

環境影響原単位の種類	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>
プロセス									
生コン製造 (1m <sup>3</sup> )	1.326E+01	1.327E+01	1.738E+01	1.784E+01	1.785E+01	7.337E+01	7.338E+01	7.338E+01	1.949E+02
10t ダンプトラック (km・t)	4.022E-01	4.075E-01	1.720E+00	1.726E+00	1.726E+00	1.729E+00	1.946E+00	1.946E+00	1.946E+00
2t トラック (km・t)	9.655E-01	9.760E-01	5.039E+00	5.052E+00	5.052E+00	5.058E+00	5.058E+00	5.058E+00	5.045E+00
4t トラック (km・t)	6.360E-01	6.430E-01	3.320E+00	3.328E+00	3.328E+00	3.332E+00	3.332E+00	3.332E+00	3.332E+00
10t トラック (km・t)	5.071E-01	5.126E-01	2.647E+00	2.654E+00	2.654E+00	2.657E+00	2.657E+00	2.657E+00	2.657E+00
20t トラック (km・t)	2.951E-01	2.983E-01	1.540E+00	1.544E+00	1.544E+00	1.546E+00	1.546E+00	1.546E+00	1.542E+00



表7 各種類の環境影響原単位が考慮した環境負荷項目

番号	環境影響原単位 環境負荷項目	環境影響原単位								
		I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>
①	CO <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○	○	○
②	石油消費	○	○	○	○	○	○	○	○	○
③	石炭消費	○	○	○	○	○	○	○	○	○
④	天然ガス消費	○	○	○	○	○	○	○	○	○
⑤	CH <sub>4</sub>		○	○	○	○	○	○	○	○
⑥	N <sub>2</sub> O		○	○	○	○	○	○	○	○
⑦	SO <sub>x</sub>			○	○	○	○	○	○	○
⑧	NO <sub>x</sub>			○	○	○	○	○	○	○
⑨	PM			○	○	○	○	○	○	○
⑩	COD				○	○	○	○	○	○
⑪	T-N				○	○	○	○	○	○
⑫	T-P				○	○	○	○	○	○
⑬	廃棄物埋立による土地利用 改変と処分場の枯渇				○	○	○	○	○	○
⑭	森林や海のCO <sub>2</sub> 固定減少					○	○	○	○	○
⑮	土地利用改変						○	○	○	○
⑯	廃棄物埋立や焼却による 項目①～⑫の影響を減算							○	○	○
⑰	廃棄物埋立や焼却による 項目①～⑫と⑭～⑮の影響 を減算								○	○
⑱	廃棄物埋立や焼却による 項目①～⑭の影響を減算									○

表8 コンクリートの調合および性能

調合と性能	シリーズ						
	C-0	C-1	C-2	S-0	S-1	S-2	
コンクリートの種類	高流動コンクリート			吹き付けコンクリート			
フライアッシュの種類	JIS II			JIS I		JIS IV	
代替される材料	普通セメント			陸砂			
水セメント比 (%)	30.9	43.5	60.5	54.2	51.4	54.2	
水結合材比 (%)	30.9	30.4	30.2	54.2	40.2	42.4	
置換率 (%)	0	30	50	0	10	10	
調合 (kg/m <sup>3</sup> )	水	175	165	159	195	185	195
	普通セメント	567	379	263	360	360	360
	FA	0	163	263	0	100	100
	川砂	745	745	745	-	-	-
	陸砂	-	-	-	1075	982	958
	川砂利(2205)	806	806	806			
	砕石				737	748	737
	化学混和剤	8.80	8.33	7.97	4.32	4.32	4.32
スランブフロー (mm)	600~700			-			
スランブ (cm)	-			10~14			
28日圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	70.8	59.5	50.4	27.5	32.9	29.8	

注: 川砂と川砂利の表乾密度: 2.57と2.60 g/cm<sup>3</sup>、陸砂と砕石の表乾密度: 2.59と2.64 g/cm<sup>3</sup>、陸砂と砕石の粗粒率: 2.87と6.19、砕石の最大寸法: 15mm

図6に示すように、JIS II種FAが普通セメントを代替する割合の増加に伴っていずれの種類もEIIも小さくなるのが認められた。つまり、FAの使用量が多いほど、コンクリートの環境影響は小さい。

一方、一部の陸砂がJIS I種FAに代替されたS-1は、基準シリーズ(S-0)よりEII-1が大きい。これは、JIS I種FAの収集・分級による環境影響は、陸砂の採取より大きいためである。また、JIS IV種FAの製造にはエネルギーがあまり消費されないが、FAの運送距離が陸砂の約3.7倍であるため、S-2のEII-1はS-0より大きい。これによって、廃棄物利用は、必ずしもコンクリートの環境負荷を低減するわけではなく、リサイクル方法および輸送距離等に依存することがわかった。

CO<sub>2</sub>とエネルギー資源消費を負荷項目として取り上げたEII-1は地球環境への影響を評価するものと考えられる。土地利用改変および廃棄物埋立の地域環境負荷項目も考慮したEII-6の評価値はEII-1より大幅に増大した。コンクリートの環境影響評価は、EII-6を用いるのが適切である。

EII-1のように、EII-6も、FAを使用した場合は未使用の場合より小

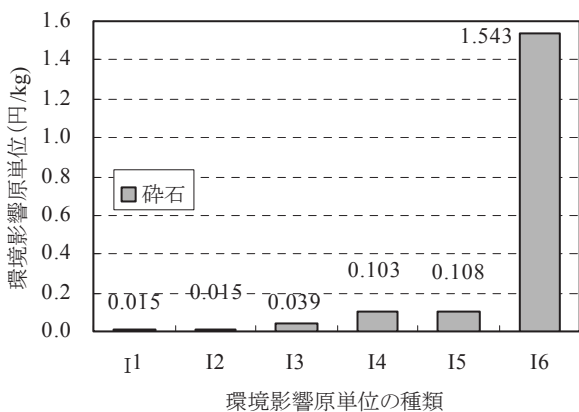


図3 砕石の環境影響原単位

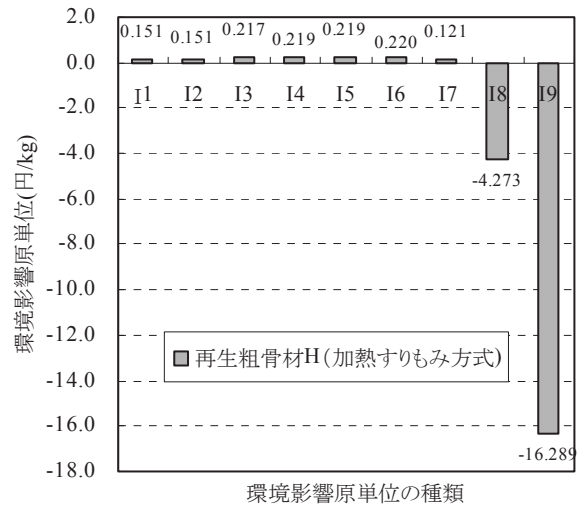


図4 再生粗骨材Hの環境影響原単位

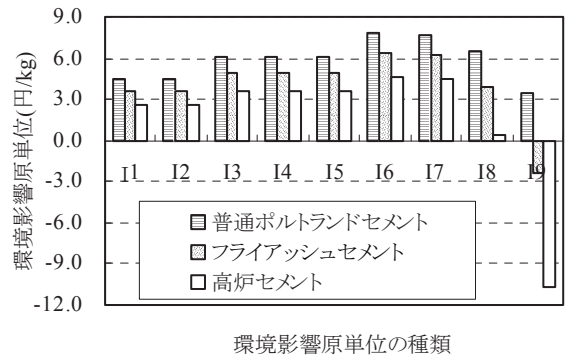


図5 3種類のセメントの環境影響原単位

小さく、JIS II種の使用量は多いほど、小さくなるのが認められた。陸砂の一部がJIS IV種FAで代替されたコンクリートのEII-6は、JIS I種FAで代替したものより大きい。

廃棄物の埋立や焼却処分を回避するリサイクルの環境保全効果を反映するEII-8とEII-9の値は、EII-6より大幅に減少した。JIS II種FAがそれぞれ30%と50%の普通セメントを代替したシリーズC-1とC-2のEII-9は負値になった。これによって、コンクリートの製造によって自然資源とエネルギーが消費されるが、廃棄物やリサイクル材が大量、かつ適切に用いられたら、製造されたコンクリートは、地球・地域環境の保全に貢献できるものになりうると考えられる。リサイクルの環境便益を評価結果に十分に反映・強調しようとする場合には、コンクリートの環境影響評価はEII-9によって行われることが望ましい。環境影響評価の際に、評価の目的に応じてI<sub>1</sub>~I<sub>9</sub>を選択することができる。

5. まとめ

本研究では、日本版の被害算定型影響評価手法の改良版(LIME2)を基に、コンクリートの環境影響評価方法を提案した。また、コンクリートの構成材料の製造に投入された資源・エネルギー量によって、36種類の構成材料、練混ぜおよび5種類の輸送方法の14種の環境負荷原単位を整備した。さらに、異なる環境負荷項目を考慮して構成材料と練混ぜ・輸送プロセスを対象とする9種類の環境影響原単位を計算した。提案した評価手法によってフライアッシュコンクリートの環境影響の評価を試みた。結論は以下のようである。

- (1) コンクリートの環境影響を的確に評価するためには、CO<sub>2</sub>の排出およびエネルギー資源の消費などの地球環境負荷項目だけではなく、土地利用改変および廃棄物埋立などの地域環境負荷項目も取り上げるべきである。
- (2) コンクリートの環境影響評価は、構成材料の環境影響原単位 I<sub>6</sub>を用いたほうがよいが、廃棄物や副産物をコンクリートにリサイクルする環境保全効果を評価結果に十分に反映・強調しようとする場合には、I<sub>9</sub>を用いた評価が望ましい。
- (3) リサイクル材を用いると、コンクリートの環境影響が小さくなるが、環境影響を低減することができるかどうかは、リサイクル方法およびリサイクル材の輸送距離などに依存する。

今後、コンクリート用材料の製造のインベントリデータを収集して、環境負荷原単位と環境影響原単位のデータベースを修正・充実する予定である。

参考文献

- 1) <http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/5590.html> (参照 2015.3.10)
- 2) <http://www.jcassoc.or.jp/cement/ljpn/jg1.html> (参照 2015.3.10)
- 3) 土木学会コンクリートの環境負荷評価研究委員会：コンクリートの環境負荷評価研究小委員会報告，コンクリート工学，Vol.40，No. 12，pp.10-16，2012.12

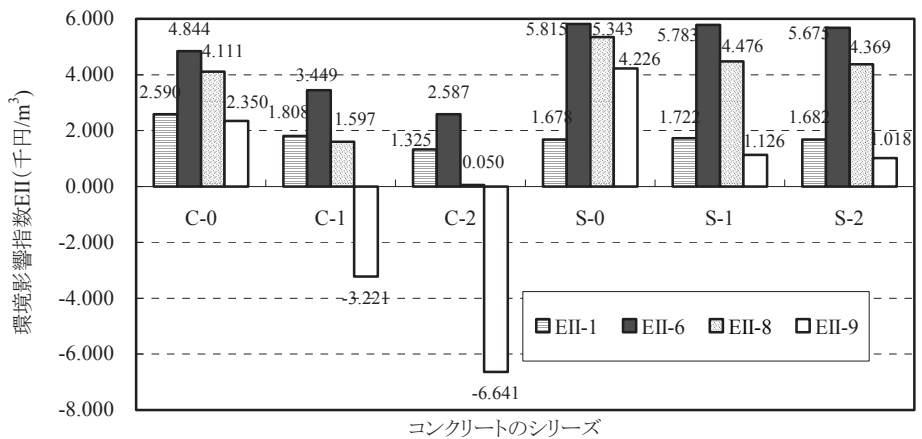


図6 異なる種類の環境影響原単位を用いたフライアッシュコンクリートの環境影響の評価結果

- 4) 社団法人 産業環境管理協会：製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書，pp.719-918，2004.3
- 5) 伊坪徳宏・稲葉敦：LIME2-意思決定を支援する環境影響評価手法，社団法人産業環境管理協会，pp.108-606，2010.11
- 6) 李柱国ほか：環境配慮型材料設計のためのコンクリートの環境負荷性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No.1，pp.765-770，2007.7
- 7) 道正泰弘・村雄一：建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート塊のリサイクルシステムー被害算定型環境影響評価手法 LIME を用いたコンクリート塊再利用の評価，日本建築学会技術報告集，Vol.14，No.28，pp.393-398，2008.10
- 8) 安部和子ほか：土地利用による生物多様性の影響評価，第2回日本版被害算定型影響評価ワークショップ講演集，pp.13-30，2002.7
- 9) 資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課：平成23年度版採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(平成23年度版)，pp.2-4，2014.12
- 10) 株式会社 京星のホームページ：http://www.concle.co.jp/cn20/kk01.html，(参照 2015.8.25)
- 11) 中野加都子ほか：廃アスファルトコンクリートの再資源化による環境インパクト低減の評価，土木学会論文集，No.559/VII-2，pp.81-89，1997.2
- 12) 藤本郷史ほか：生コンクリート工場の電力消費傾向に関する一考察，日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.33，No.117，pp.1-4，2009.3
- 13) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)，pp.13-73，2005.11
- 14) 李柱国・勾坂幸幸：DtT法を用いたコンクリートの環境インパクトの統合評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.361-362，2003.9
- 15) 香取恒雄：レディーミクストコンクリート工場における環境負荷低減への取り組み，コンクリート工学，Vol.48，No. 9，pp.74-77，2010.9
- 16) 東京都水道局：環境報告書，p.5，2012
- 17) 鶴巻峰夫・野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.643/VII-14，pp.11-20，2000.2
- 18) 佐野奨ほか：鉄筋コンクリートのライフサイクルアセスメント，太平洋セメント研究報告，No.142，pp.111-122，2002
- 19) 日本建築学会：建築物のLCAツール，Ver.4.04，2005.12
- 20) 株式会社エコマネジメント研究所：焼却・埋立等の廃棄物処理における環境負荷原単位調査，pp.26-31，2000.2
- 21) 産業環境管理協会：JEMAI LCA Pro ver.2ソフトウェア，2013.2
- 22) 成田健ほか：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.925-930，2001.6
- 23) 油野邦弘ほか：分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.91-96，2000.7

# ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGY OF CONCRETE

*Zhuguo LI\* and Takaaki OHKUBO\*\**

\* Assoc. Prof., Dept. of Information and Design Eng., Graduate School of Sci. and Eng., Yamaguchi University, Dr.Eng.

\*\* Prof., Social Environmental and Space Division, Graduate School of Eng., Institute of Eng., Hiroshima University, Dr.Eng.

This study aims to develop an environmental impact assessment methodology for concrete. Firstly, in Chapter 2 we discussed the environmental burden factors of concrete, which should be considered and are able to be assessed, and their inventory methods. System boundary of LCI (see Fig.1) and an integrated assessment method (see Eq.(1) of environmental impacts were proposed for concrete.

Then, in Chapter 3, 15 kinds of embodied energy and emission intensity data were calculated for 36 kinds of raw materials of concrete, concrete mixing, and 5 types of transportation methods, on basis of the energy and natural resources input (see Table 3) and the embodied energy and emission intensity data of various energy (see Table 4). 9 types of environmental impact intensities ( $I_1$ ~ $I_9$ , see Table 7) that consider different environmental burden factors were further calculated (see Table 5 and Table 6) by using Bottom-Up Method, and the weighting factors (see Table 2) given by the modified version (LIME2) of LIME (Life-Cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling), respectively. Also, 9 types of environmental impact intensities ( $I_1$ ~ $I_9$ ) are shown in Fig. 3~5 for crushed stone, recycled coarse aggregate and three kinds of cements (ordinary portland cement, fly ash cement, and blast-furnace slag cement). These figures show that in order to access exactly the environmental impacts of concrete's raw material, land use change should be considered. And for exactly reflecting the environmental benefits of waste recycling, the environmental impacts of wastes recycled in concrete's raw material when disposed into landfill should be counted as a negative value.

Finally, in Chapter 4, the environmental impact indexes (EII) of 6 series of fly concrete (see Table 8) were calculated by using 4 kinds of the environmental impact intensities ( $I_1$ ,  $I_6$ ,  $I_8$ ,  $I_9$ ), as shown in Fig.6. Fig.6 shows that (1) recycling does not always decrease the environmental impact of concrete, unless recycling method is suitable; (2) the EII using the  $I_6$  that integrates the environmental impacts of 14 kinds of burden factors, would rationally evaluate the environmental impact of concrete. However, the EII using the  $I_6$  that was obtained by subtracting the environmental burdens of recycled wastes' disposal can clearly reflect the environmental benefits of recycling.

(2015年4月3日原稿受理, 2015年11月5日採用決定)