環境と経済の両側面を考慮したセメントおよびコンクリートの評価

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF CEMENT AND CONCRETE

新見 龍男^{*1}, 桐野 裕介^{*2}, 加藤 弘義^{*3}, 河合 研至^{*4}

*Tatsuo SHINMI, Yusuke KIRINO, Hiroyoshi KATO
and Kenji KAWAI*

To achieve SDGs, corporate activities considering environmental aspects are required, while evaluation using an economic indicator is also necessary for decision-making. The present study investigated the environmental impacts of cement and concrete considering economic aspects and calculated the full cost as the sum of the LCA cost and LCC. As a result, for both cement and concrete, the full cost for ordinary portland cement was lower than that for portland blast-furnace slag cement type B. For concrete using portland blast-furnace slag cement, the increase in the slag content increased the full cost of the cement.

Keywords : Waste indicator, Full cost, LCA cost, LCC, Portland cement, Portland blast-furnace slag cement

廃棄物指標, フルコスト, LCA コスト, LCC, ポルトランドセメント, 高炉セメント

1. はじめに

2015年の国連サミットにおいて、グローバルな社会課題を解決し持続可能な世界を実現するための国際目標であるSDGs（持続可能な開発目標：Sustainable Development Goals）が採択された。世界中の企業がSDGsを経営の中に取り込もうと力を注いでおり、日本においてもSDGsを経営に組み込むべく様々な取組みが進められている¹⁾。SDGs達成のためには、社会や環境に配慮した企業活動が求められ、多くの企業においてライフサイクルアセスメント（以下、LCA）が実施されている。

しかしながら、LCAによる評価結果は環境側面に関する情報のみであり、企業活動の意思決定には経済側面の情報が必須となることから、評価結果が企業活動の意思決定に直結しないとされている²⁾。

一方、経済的側面の評価としてライフサイクルコスト（以下、LCC）が注目されている。LCCとは、製品やシステム、建築物などの誕生から廃棄に至るまでに掛かる費用の総額であり³⁾、LCAの実施方法の多くをLCC算出に活用することが出来る²⁾。また、初期コストだけでなくランニングコストまで考慮して長期的な経済性を評価することから、企業活動において最適な意思決定を行うことが可能となる。そのため、LCCとLCAを総合的に評価することが、SDGsの達成に向けて重要であると考えられる。

過去の研究においては、LCAの結果を経済価値に換算したLCAコストとして、LCCと総合的に評価した報告がなされており、評価

対象はICパッケージ⁴⁾、途上国における浄水器の利用⁵⁾、電気製品の省エネ化⁶⁾など多様である。一方で建設産業は地球環境に多大な影響を及ぼすものの、LCAコストに関する評価は少なく、LCCとの関係性を評価した知見も少ない。そのため、建設費に及ぼす環境影響の程度は不明な点が多い。

セメント産業における主要な環境影響はリサイクル資源（廃棄物・副産物）の活用とCO₂排出が挙げられる。しかしながら、セメントの環境影響評価はCO₂排出量の観点のみで実施されることが多く、リサイクル資源の活用を考慮した評価はほとんど見られない。筆者らはこれまで、セメント製造におけるリサイクル資源活用を評価する廃棄物指標を提案するとともに⁷⁾、CO₂排出量を含めたセメントの主要な環境影響を総合的かつ簡便に評価するための方法も提案した⁸⁾。また、構造物のライフサイクルとしてセメントの製造から構造物の解体・廃棄までのLCAを実施した⁹⁾。なお、統合化評価を実施するにあたっては、日本版被害算定型影響評価手法の最新版であるLIME3の統合化係数を用い、経済指標として評価値を算出した。その結果、普通ポルトランドセメント（以下、PC）の方が混合セメントである高炉セメントB種（以下、BB）やフライアッシュセメントB種より評価値が高いことが示された。しかしながら、解体後のコンクリート塊の廃棄に関する負荷が著しく大きくなり、コンクリート塊のリサイクル率99%を考慮すると環境負荷を過大評価しているとも考えられたため、評価方法には課題が残った。

¹⁾ ㈱トクヤマセメント開発 Gr. 工修

²⁾ 太平洋セメント㈱中央研究所 理博

³⁾ ㈱トクヤマセメント開発 Gr. リーダー・工博

⁴⁾ 広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授・工博

Cement Development Dept., Tokuyama Co., M.Eng.

Central Research Laboratory, Taiheiyo Cement Co., Dr.Sc.

Leader, Cement Development Dept., Tokuyama Co., Dr.Eng.

Prof., Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Dr.Eng.

Fig.1 System boundary in the previous study

そこで本検討では、コンクリート構造物の LCA に関してコンクリート塊の解体・廃棄に関する評価方法を再検討するとともに、セメントおよびコンクリートについて経済影響を考慮した LCA を実施し、LCC と LCA コストの関係性を示すことを目的とした。

2. 評価方法の概要

2.1 廃棄物指標

循環型社会の構築のためにはリサイクル資源を多量に活用することが望まれている。一方、リサイクル資源の中でも、比較的容易に活用できる資源と活用が困難な資源が存在しており、前者は比較的広い産業で活用できるが、後者は限られた産業でしか活用できないと考えられる。そのため、後者の活用をより優先的に進めることによって、社会全体でのリサイクル資源の活用が進むことが予想される。これを踏まえ、筆者らはリサイクル資源の活用の困難さを反映した廃棄物指標 Iw_4 を提案した⁷⁾。

本指標は、複雑な前提条件がなく、セメント製造時に使用されるリサイクル資源および製造時に発生するリサイクル資源のそれぞれの原単位を用いて算出可能としている。また、セメント産業が処理困難なリサイクル資源を積極的に活用していることの重み付けとして、リサイクル率を用いた未利用率を用いた。リサイクルが困難な廃棄物であるほどリサイクル率は低くなる、すなわち未利用率が高くなると考えられる。そのため、未利用率が高いリサイクル資源の積極的な活用により指標値が高くなる、すなわち環境貢献となることで、リサイクルの難しい資源の積極的な活用を表すことが出来ると考えられる。廃棄物指標を式(1)に、未利用率の算出式を式(2)に示す。セメント製造プロセスにおいては、発生する廃棄物は生産量の 0.0005%程度と極めて少ないことから¹⁰⁾、本研究ではリサイクル資源の発生原単位 c_k は無視した。そのため、セメントの Iw_4 はリサイクル資源の使用原単位 w_k と未利用率 γ_k で算出可能である。また、構造物を評価する際においても、構造物のライフサイクルで発生するリサイクル資源量を基に本評価式を適用した。

Table1 Values of Iw_4 for recycling and disposal used in the previous method

	Basic unit (kg/t)		Unused rate (%)	Iw_4 (kg/t)
	w_k	c_k		
Recycle	1000	0	0	0
Disposal	0	1000	100	-1000

$$Iw_{4,m} = \sum \gamma_k \times (w_k - c_k) \quad (1)$$

$$\gamma_k = 100 - R_k \quad (2)$$

ここに、

$Iw_{4,m}$: 構成材料 m の廃棄物指標 (kg/t)

γ_k : リサイクル資源の未利用率 (%)

R_k : リサイクル資源 k のリサイクル率 (%)

w_k : リサイクル資源 k の使用原単位 (kg/t)

c_k : リサイクル資源 k の発生原単位 (kg/t)

2.2 既存の方法におけるシステム境界および課題点

Fig. 1 に、これまでの検討⁹⁾で実施した既存のシステム境界を示す。検討範囲は「材料の製造」から解体発生物の「廃棄・リサイクル」までとした。

解体後のマテリアルフローについて、解体段階において「リサイクル」と「廃棄」に分類され、それぞれのプロセスで廃棄/リサイクル段階に移行すると設定した。そのため、 Iw_4 は、それぞれの排出プロセスごとにそれぞれのリサイクル資源の使用・発生原単位と未利用率を用いて算出される。また、解体段階で既に「リサイクル」と「廃棄」に分類されていることから、廃棄・リサイクル段階の排出時における未利用率は、解体発生物量の配分（リサイクル率）に関わらず、リサイクルプロセスが 0%、廃棄プロセスが 100%となる。

すなわち、「リサイクル」については、リサイクルプロセスを通過するリサイクル資源 1000kg/t を 100%利用して再生材としてリサイクルされるため、リサイクル資源の使用原単位 w_k は 1000kg/t、発生原単位 c_k は 0kg/t、未利用率は 0%となる。一方「廃棄」については、廃棄プロセスを通過するリサイクル資源 1000kg/t を 100%廃棄し、廃棄物として埋立てられるため、リサイクル資源の使用原単位 w_k は 0kg/t、発生原単位 c_k は 1000kg/t、未利用率は 100%となる。既存の方法における Iw_4 を Table1 に示す。

しかしながら、既存の方法では、コンクリート塊の廃棄・リサイクルにおけるリサイクル資源の原料が同一のコンクリート塊であるために未利用率も同一であるべきにも関わらず、その未利用率が異なっており、マテリアルフローとして整合性がないことが課題として挙げられた。また、 Iw_4 がリサイクル率に依存せず一定値であること、構造物の評価においてコンクリート塊の廃棄による負荷が著しく大きくなり⁹⁾、コンクリート塊のリサイクル率を考慮すると過大評価している可能性があること等も課題として挙げられた。

2.3 修正システム境界

Fig. 2 に、修正システム境界を示す。構造物の解体後の「廃棄・リサイクル」段階においてコンクリート塊が解体発生物として発生すると設定し、廃棄量とリサイクル量はコンクリート塊のリサイク

Fig.2 Modified system boundary

ル率に従って配分することとした。すなわち、解体発生物の一部が直接埋立て処理により廃棄され、一部が中間処理後に埋立て処理による廃棄またはリサイクルされることとした。中間処理後のリサイクル部分は路盤材としてシステム系内で処理されることとして評価しなかった。埋立て処理により廃棄される解体発生物をコンクリート塊の未利用分とし、 Iw_4 を算出した。上記条件とすることで、コンクリート塊のリサイクル率が「廃棄」の Iw_4 に直接反映されることとなる。

2.4 「廃棄・リサイクル」の廃棄物指標の再評価結果

Table2に、解体発生物のリサイクル率を任意に設定した場合の既存および修正システム境界における「廃棄」段階の Iw_4 を示す。既存の方法は、前述したように廃棄プロセスのリサイクル資源を100%廃棄することから未利用率100%となり、解体発生物のリサイクル率に関わらず Iw_4 は-1000kg/tである。一方、修正システム境界による評価では、未利用率に応じて Iw_4 が変動する結果となった。リサイクル率に応じた変動の程度は検討の余地があるものの、コンクリート塊の未利用率が小さくなるほど負の値である Iw_4 の絶対値は小さくなることから、廃棄物の活用による環境負荷の低減が捉えられており、修正システム境界の方が既存の方法より妥当性が高いと考えられる。

なお、解体発生物の廃棄・リサイクルに関する Iw_4 は、未利用率にリサイクル資源発生量を乗じた値であるために、見掛け上はリサイクル率をダブルカウントしているような計算となる。しかしながら、これは解体発生物がコンクリート塊の単一材料であることや、リサイクル分が前述の通り評価されないことによる。

2.5 LCAコストおよびLCCの算出方法

(1) 評価範囲および条件

セメントは1tあたり、コンクリートは床面積10m²×厚さ0.1mの無筋コンクリートを仮定し1m³あたりのLCAコストおよびLCC

Table2 Values of Iw_4 in disposal phase

Recycle ratio of demolition product (%)	Previous method			Modified method		
	C_k (kg/t)	Unused rate (%)	Iw_4 (kg/t)	C_k (kg/t)	Unused rate (%)	Iw_4 (kg/t)
0	1000	100	-1000	1000.0	100	-1000
20	1000	100	-1000	800.0	80	-640
40	1000	100	-1000	600.0	60	-360
60	1000	100	-1000	400.0	40	-160
80	1000	100	-1000	200.0	20	-40
100	1000	100	-1000	0.0	0	0

Table3 Basic units of wastes and byproducts

Category and items		PC	BB	Unused rate (%)
Basic units of wastes and byproducts (kg/t)	Blast furnace slag	0.0	432.7	0
	Fly ash	0.0	0.0	0
	Coal ash	127.1	72.1	2
	Sewage sludge, sludge	51.2	29.1	25
	Byproduct gypsum	33.6	29.1	0
	Waste soil from construction	31.0	17.6	12
	Incineration ash, Soot, Dust	25.7	14.6	29
	Non-ferrous slag	12.7	7.2	8
	Wood chips	10.8	6.1	6
	Foundry sand	6.9	3.9	8
	Waste plastics	10.5	5.9	27
	Steel slag	6.8	3.9	8
	Waste oil	5.4	3.1	9
	Waste white clay	4.8	2.7	8
	Recycled oil	3.3	1.9	9
	Waste tire	1.2	0.7	27
	Meat and bone meal	1.0	0.5	3
	Others	10.3	5.8	5
Iw_4 (kg/t)		34.1	19.4	
Basic unit of CO ₂ emission (kg-CO ₂ /t)		785	449	

を算出した。セメントの評価範囲は、Fig.2に示す修正システム境界内における「材料の製造」のセメントまでとした。コンクリートの評価範囲は「材料の製造」から「廃棄・リサイクル」までとした。コンクリートの評価に関して、本検討では構造物に必要な材料量のみ考慮すること、使用された材料は解体後に全てリサイクルまたは埋立て処分されることとし、「施工」、「供用」、「解体」において廃棄物は発生しないとした。また、輸送に関するCO₂は考慮しなかった。

(2) セメントの廃棄物指標および温暖化指標

評価するセメントはPCおよびBBとし、BB中の高炉スラグ微粉末の混合率は43.3%と仮定した。セメントの廃棄物指標はTable3に示すセメントのリサイクル資源原単位および未利用率¹⁰⁾を用いて式(1)で算出した値を、温暖化指標はCO₂排出量原単位を用いた。なお、未利用率の算出に用いたリサイクル率は、既往の研究¹²⁾において廃棄物処理における減量化を考慮した式(3)で定義される R_{k3} の値を用いた。また、CO₂排出量原単位は文献¹⁰⁾に示す直接排出したCO₂に購入電力分を加えた値を用い、購入電力からCO₂排出量原単位への変換には温室効果ガス排出量・報告・公表制度の代替値(2011)を用いた。セメントの廃棄物指標およびCO₂排出量原単位をTable3に示す。

$$R_{k3} = A_{recycle} / (A_{recycle} + A_{disposal}) \times 100 \quad (3)$$

ここに、

$A_{recycle}$: 再生利用量 (kg)

$A_{disposal}$: 最終処分量 (kg)

Table4 Mix proportions of concrete

	kg/m ³				
	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Chemical admixture
PC	184	323	940	881	3
BB	182	319	921	898	3

Table5 Details of demolition machines

	Machine	Summary	Fuel	
			Type	Consumption rate (L/h)
Demolition	Base machine (Backhoe)	0.8m ³	Diesel	16
	Concrete crushing machine	Crushing power 549~981kN	-	-
Accumulation and loading	Backhoe	0.8m ³	Diesel	16

(3) 評価したコンクリートの概要

使用材料は、セメントは PC および BB、骨材は天然細骨材および天然粗骨材とした。また、調合条件は 24-18-20 とした。Table4 にコンクリート調合を示す。「施工」に関しては、容量 3.0m³ のコンクリートミキサで生コンクリートが混練され、3.0m³ アジテータ車で運搬後に人力で施工されることとした。なお、施工に関してはコンクリートミキサのみ考慮することとした。「解体」に関しては、新・解体工法と積算（2017 年発行）¹³⁾および公共建築工事積算基準平成 31 年版¹⁴⁾を参考にして圧砕工法を用いることとした。ベースマシンは 0.8m³ のバックホウとし、破壊力 549~981kN のコンクリート圧砕機を取り付けて解体することとした。解体後はバックホウにより集積して搬出することとした。また、文献¹⁴⁾の作業能率および文献¹³⁾の燃料消費率から、機械の燃料使用量を算出した。解体および集積機械の詳細を Table5 に、作業能率および燃料使用量を Table6 に示す。「廃棄・リサイクル」に関しては、平成 30 年度建設副産物実態調査を参考にし、解体発生物のうち 99.3%が路盤材として再利用され、0.7%が最終処分場に埋め立て処分されることとした。また、埋め立てられる 0.7%のうち 0.5%は現場から直接安定型処分場へ、0.2%は中間処理後に廃棄されることとした。

(4) コンクリートの廃棄物指標および温暖化指標

コンクリートの「材料の製造」から「廃棄」の各項目の廃棄物指標 $Iw_{4,i}$ は、式(1)により算出した各項目内の構成材料に関する廃棄物指標 $Iw_{4,m}$ に構成材料の数量を乗じたものの総和として、式(4)により算出した。また、廃棄物の排出に関する $Iw_{4,i}$ は、2.4 で示す修正した Iw_4 を用いて算出した。システム境界内全体の廃棄物指標は、各項目の廃棄物指標 $Iw_{4,i}$ の合計として算出した。システム境界内全体の温暖化指標は、式(5)により算出した「材料の製造」から「廃棄・リサイクル」までの各項目の CO₂ 排出量 $Ig_{2,i}$ の合計として算出した。セメント以外の使用材料、施工時のコンクリートミキサおよび解体発生物の廃棄に関する CO₂ 排出量原単位は文献¹⁵⁾の値を用いた。解体に関する CO₂ 排出量は、Table6 に示す燃料使用量に文献¹⁵⁾に記載の CO₂ 排出量原単位を乗じることで算出した。コンクリート塊のリサイクルに関する環境負荷はリサイクル先での使用時に計上されるとし、本検討内では評価しなかった。なお、いずれの CO₂ 排出量原単位も、セメントの場合と同様に購入電力分を加えた値を用いた。Table7 に、構成材料に関する廃棄物指標および CO₂

Table6 Working efficiency and fuel consumption

	Working			Fuel		
	Unit (*)	Efficiency (day/*)	Time (day)	Fuel type	Consumption rate (L/h)	Consumption amount (L)
Demolition	m ²	0.0345	0.345	Diesel	16	44.2
Accumulation and loading	m ³	0.028	0.028	Diesel	16	3.58

Table7 Waste indicators and CO₂ emission units

	Iw_4 (kg/t)	Ig_2	
		Unit(*)	(kg-CO ₂ /*)
PC	34.1	t	768.1
BB	19.4	t	437.4
Fine aggregate	0.0	t	6.9
Coarse aggregate	0.0	t	5.2
Rebar	0.0	t	944.7
Concrete mixer	0.0	m ³	0.7
Diesel	0.0	L	2.6
Disposal	-0.1	t	1.6

排出量原単位を示す。

$$Iw_{4,i}' = \sum (Mm \times Iw_{4,m}) / 1000 \quad (4)$$

$$Ig_{2,i}' = \sum (Mm \times Ig_{2,m}) / 1000 \quad (5)$$

ここに、

$Iw_{4,i}'$: 項目 i の廃棄物指標 (t)

Mm : 構成材料 m の使用量 (t)

$Ig_{2,i}'$: 項目 i の温暖化指標 (t)

$Ig_{2,m}$: 構成材料 m の CO₂ 排出量原単位(kg/t)

(5) LCA コストの算出方法

LCA コストは、セメントまたはコンクリートに関する廃棄物指標 $Iw_{4,i}'$ と温暖化指標 $Ig_{2,i}'$ を経済的指標で統合化することで算出した。両指標の統合化は、それぞれの指標に重み W_3 および G_3 を乗じたものの和として、式(6)により算出した⁹⁾。重み W_3 および G_3 の定義を式(7)および式(8)に示す。

重み付けに関しては、廃棄物指標および温暖化指標ともに値が比較的大きく、一般的な建設材料である PC の環境影響を基準とした。すなわち、重み W_3 および G_3 は、PC の廃棄物影響および温暖化影響を表す $Ew_3(PC)$ および $Eg_3(PC)$ をそれぞれ PC の廃棄物指標および CO₂ 排出量原単位で除することで、PC で標準化した値とした。 $Ew_3(PC)$ および $Eg_3(PC)$ については、日本版被害算定型影響評価手法 LIME3 の産業廃棄物および CO₂ に関する統合化係数に、それぞれ PC のリサイクル資源の使用原単位および CO₂ 排出量原単位を乗じることで、式(9)および式(10)により算出した。統合化係数とは、LIME3 において、各種環境影響のインベントリから単一指標を得るための係数である。LIME3 で統合化評価を行う場合には、環境負荷物質ごとにそれぞれの統合化係数を用いて評価を行う。本研究では簡易化のため、廃棄物の重み付けに関しては、ポルトランドセメントで最も活用量の多い石炭灰に対応する産業廃棄物(ばいじん)の値 (0.201US\$/kg) を用いた。なお、活用量が二番目に多い産業廃棄物(汚泥)では 0.253US\$/kg、活用量が三番目に大きい一般廃棄物(覆土)では 0.175US\$/kg であり、本研究で用いた産業廃棄物

(ばいじん) の値との差はそれほど大きくない。温暖化指標については地球温暖化 (CO₂) の値 (0.017US\$/kg) を用いた。なお、リサイクル資源の使用は環境貢献であるため式(6)右辺の第 1 項は正の値、CO₂排出は環境負荷であるため式(6)右辺の第 2 項は負の値となる。また、LIME3 の統合化係数を用いた場合、指標値が US\$として算出されるため、1US\$あたり 100yen として日本の通貨に換算した。

$$I_l = W_3 \times Iw_{4,l}' + G_3 \times Ig_{2,l}' \quad (6)$$

$$W_3 = Ew_3(PC)/Iw_4(PC) \times 1000 \quad (7)$$

$$G_3 = Eg_3(PC)/Ig_2(PC) \times 1000 \quad (8)$$

$$Ew_3(PC) = \text{統合化係数(産業廃棄物(ばいじん))} \\ \times \text{リサイクル資源の使用原単位(PC)} \times 100 \quad (9)$$

$$Eg_3(PC) = -\text{統合化係数(CO}_2\text{)} \\ \times \text{CO}_2\text{排出量原単位(PC)} \times 100 \quad (10)$$

ここに、

I_l : 項目 l の LCA コスト (yen)

W_3 : PC で標準化した廃棄物指標に関する重み (yen/t)

G_3 : PC で標準化した温暖化指標に関する重み (yen/t)

$Ew_3(PC)$: PC の廃棄物影響 (yen/t)

$Iw_4(PC)$: PC の廃棄物指標 (kg/t)

$Eg_3(PC)$: PC の温暖化影響 (yen/t)

$Ig_2(PC)$: PC の CO₂排出量原単位 (kg/t)

2.6 セメントの LCC 算出方法

セメントについてはセメントの販売価格とし、文献(建設物価 平成 30 年 2 月版)¹⁰⁾における「セメント (バラ)」価格の 47 都道府県主要地の平均値を用いた。

2.7 コンクリートの LCC 算出方法

コンクリートについて、「材料の製造」に関する費用は生コンクリートの販売価格とし、文献¹⁵⁾における価格の 47 都道府県主要地の平均値を用いた。

「施工」に関する費用は、文献¹⁴⁾に記載の「小型構造物 (工作物の基礎等)」のコンクリート打設に係る歩掛に施工数量および単価を乗じることで算出した。Table8 に、単位容積あたりの施工単価の詳細を示す。「特殊作業員」の単価は文献¹⁰⁾における価格の 47 都道府県主要地の平均値を用い、「その他」については、文献¹⁴⁾に従い「特殊作業員」の価格の 25%を適用した。

「解体」に関する費用は、文献¹⁴⁾に記載の「上部躯体とりこわし」の歩掛に施工数量を乗じることで算出した。Table9 に、単位面積当たりの解体単価の詳細を示す。「ベースマシン運転」の単価は文献¹⁴⁾に記載の表 RA-22-6 および別表 RA-22-6-1、文献¹⁴⁾、¹⁷⁾を用いて算出した。「コンクリート圧砕機」の単価は文献¹³⁾の値を、「普通作業員」の単価は文献¹⁰⁾における価格の 47 都道府県主要地の平均値を用い、「その他」については文献¹⁴⁾に従い「普通作業員」の 25%の価格を用いた。解体後のコンクリート塊の集積に関しては、文献¹⁵⁾に記載の「コンクリート類集積積込」の歩掛にバックホウの運転単価を乗じることで算出した。バックホウの運転単価はベースマシン運転と同様の方法で算出した。Table10 に単位容積あたりのコン

Table8 Construction unit cost

	Unit (*)	Unit cost (yen/*)	Productivity (* /m ³)	Cost (yen/m ³)	Construction cost (yen/m ³)
Special worker	Person	28,160	0.65	18,304	25,344
Other	Set	7,040	1	7,040	

Table9 Demolition unit cost

		Summary	Unit (*)	Unit cost (yen/*)	Productivity (* /m ²)	Cost (yen/m ²)	Total cost (yen/m ²)
Demolition	Driving of base machine	Backhoe 0.8m ³	day	75,771	0.0345	2,614	4,277
	Concrete crushing machine	Crushing power 549~981kN	day	17,900	0.0345	618	
	Normal worker		Person	24,247	0.0345	837	
	Other		set		1	209	

Table10 Accumulation and loading unit cost

	Summary	Unit (*)	Unit cost (yen/*)	Productivity (* /m ³)	Cost (yen/m ³)
Driving of backhoe	0.8m ³	day	75,771	0.028	2,122

Table11 Intermediate processing and final disposal unit cost

Cost (yen/t)	
Intermediate processing	Final disposal
Concrete lump	Stable landfill
2,913	12,333

クリート塊集積の費用を示す。解体後に廃棄・リサイクルされるコンクリート塊の費用について、中間処理費には最終処分費も含まれる。そのため、平成 30 年度建設副産物実態調査を参考にして廃棄分の費用を配分した。すなわち、現場から最終処分場に直接廃棄される 0.5%分は最終処分費とし、再資源化処理に廃棄される 0.2%分は中間処理費とした。

中間処理費は、文献¹⁶⁾に記載の中間処理受託料金におけるコンクリート塊 (無筋・30cm 以下) の各県の平均値を用いた。なお、文献¹⁴⁾には関東地方の料金のみ記載されており、栃木県については下限値しか記載されていなかった。中間処理費を Table11 に示す。廃棄に関する費用は、最終処分費用として文献¹⁶⁾における最終処分受託料金の安定型処分場の値を用いた。なお、文献¹⁶⁾には関東地方における茨城県、群馬県および千葉県の下限値のみの記載であったため、それらの平均値を用いた。最終処分費を Table11 に示す。

2.8 フルコストによる総合評価

LCA コストと LCC の和をフルコストとして算出して総合評価を行った。なお、LCC は負荷としてマイナスの値とした。

2.9 LIME3 による評価結果との比較

既存の LCA 手法である LIME3 を用いて算出した LCA コストと 2.6 および 2.7 において算出した LCC の和によりフルコストを算出し、前節までで提案した方法で算出したフルコストと比較を行った。LIME3 による LCA コストの算出は、各セメントの原料原単位、リ

Table12 Value of Iw_4 and Ig_2 for portland blast-furnace slag cement

	BA	BB	BC
Iw_4 (kg/t)	27.3	19.4	12.0
Ig_2 (kg-CO ₂ /t)	626	437	280

Fig. 3 Iw_4 of PC and BB

Fig. 4 LCA cost of cement

Fig. 5 Full cost of cement

Table13 Detail for the full costs of cement

	PC	BB
LCA cost	5,516	3,125
LCC	-10,802	-10,578
Full cost	-8,329	-9,181
LCA cost/LCC	0.51	0.30

Fig. 6 LCA cost of concrete

サイクル資源量、環境負荷物質発生量、購入電力などのインベントリデータに LIME3 の統合化係数を乗じることで得られた値の総和により算出した。インベントリデータは本研究で提案する指標の算出に用いたデータと同じものを用いた。

なお、本検討における「廃棄物」と「副産物」の扱いについては既往の報告¹⁴⁾と同様の方法で分類した。「廃棄物」に分類される品目はセメントが受け入れることで埋立を回避したものとみなし環境に貢献することとした。一方で、「副産物」に分類される品目（本検討では、高炉スラグ微粉末、副産石こう、再生砕石）は一般に有償であり、製品として消費されることが前提と考えられるため、埋立回避による貢献は考慮しなかった。

2.10 高炉セメントを用いたコンクリートの評価

2.1 から 2.8 までの方法を用いて、高炉セメントを用いたコンクリートの評価を行った。高炉セメントは A 種（以下、BA）、B 種、C 種（以下、BC）とし、高炉スラグ微粉末の混合率はそれぞれ 20%、43.3%、65%とした。高炉セメントを用いたコンクリートの調合は BB を使用した場合と同一とした。コンクリートの LCC について、BA および BC は建設物価に価格の記載がなかったが、製造や物流の条件が価格に影響することが考えられたものの、本検討では便宜上 BB と同様の値を用いた。Table12 に、各高炉セメントの Iw_4 および Ig_2 を示す。

3. 結果

3.1 セメントの廃棄物指標

Fig. 3 に、PC および BB の廃棄物指標を示す。廃棄物指標は PC の方が BB より高かった。これは、PC の方がリサイクル資源のうち処理困難な廃棄物を大量に活用していることを表している。

3.2 セメントの評価結果

Fig. 4 に、セメントの LCA コストを示す。廃棄物活用に関する貢献が CO₂ 排出に関する負荷を上回り、総合的には貢献側の値となった。また、PC の方が BB より貢献側に大きい値を示した。Fig. 5 に、セメントのフルコストを、Table13 にフルコストの詳細を示す。セメントの LCC の負荷は BB の方が PC より若干小さかった。一方で、LCA コストは PC の方が BB より貢献側に大きいことから、フルコストでは PC の方が BB より貢献側に大きかった。そのため、環境側面のコストを含めて考慮すると、PC の方が BB より優位であることが示された。また、LCC の負荷に対する LCA コストの貢献の比率も PC の方が BB より大きかったことや、PC と比較して BB の方がフルコストの比率が 10%程度大きかったことから、PC の方がコスト面において合理的であると考えられる。

3.3 コンクリートの評価結果

Fig. 6 に、コンクリートの LCA コストを示す。セメントと同様に総合的には貢献側の値を示し、PC の方が BB より大きい値を示した。Fig. 7 にコンクリートのフルコストを、Table14 にフルコストの

Fig. 7 Full cost of concrete

Table14 Detail for the full costs of concrete

		PC	BB
Results (yen)	LCA cost	1,763	978
	LCC	-44,037	-44,819
	Full cost	-42,274	-43,841
LCA cost/LCC		0.040	0.022

Fig. 8 LCA costs and full cost of cement by LIME3
(left: LCA cost, right: full cost)

詳細を示す。評価結果は PC の方が BB より貢献側に大きくなり、セメントの評価結果と同様の傾向となった。また、PC を使用した場合のフルコストは BB を使用した場合より約 4%縮減可能であることが示された。一方で、LCC に対する LCA コストの比率や PC と BB のフルコストの比率はセメントの場合より著しく小さかった。これは、LCA コストの主要な構成要素はセメントであり、コンクリートではセメントの影響が希釈されて小さくなったことが要因である。

3.4 LIME3 との比較

LIME3 を用いて評価した LCA コストおよびフルコストについて、セメントの結果を Fig. 8 に、コンクリートの結果を Fig. 9 に示す。セメント、コンクリートいずれも、LCA コストやフルコストの評価値およびその内訳は廃棄物指標を用いた場合とほぼ同値であり整合的な結果が得られた。このことから、本研究で提案する評価方法は、リサイクル資源の使用・発生原単位と未利用率を用い、比較的簡便に妥当性のある指標値を示すことが出来ると考えられる。

3.5 高炉セメントを使用したコンクリートの評価結果

Fig. 10 にフルコストを、Table15 にフルコストの詳細を示す。高炉スラグ微粉末の混合率が多いほど LCA コストは低くなり、フルコストも負荷側に大きくなった。LCC 負荷に対する LCA コストの

Fig. 9 LCA cost and full cost of concrete by LIME3
(left: LCA cost, right: full cost)

Fig. 10 Full costs of concrete using portland blast-furnace slag cement

Table15 Detail for the full costs of concrete using portland blast-furnace slag cement

		PC	BA	BB	BC
Results (yen)	LCA cost	1,763	1,379	978	594
	LCC	-45,800	-45,797	-45,797	-45,797
	Full cost	-44,037	-44,418	-44,819	-45,203
LCA cost/LCC		0.038	0.030	0.021	0.013

貢献の比率も 0 に近付くことから、フルコストで評価する場合、高炉スラグ微粉末の混合率の増大は不利となることが示された。

4. まとめ

筆者らが提案した廃棄物指標を用い、経済影響を考慮したコンクリートの環境影響評価を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 構造物解体後の廃棄に関して廃棄物指標を再検討した結果、既存の方法より妥当性が高いことが示された。
- (2) セメントおよびコンクリートについて環境的側面と経済的側面を考慮したフルコストで評価した結果、ポルトランドセメントの方が高炉セメント B 種より有利であることが示された。
- (3) コンクリートの環境影響に関するコストは、ライフサイクルコストより著しく小さかった。
- (4) 高炉セメント A 種、B 種および C 種を用いたコンクリートについてフルコストで評価した結果、高炉スラグ微粉末の混合率の増大は不利になることが示された。

なお、本検討で用いた廃棄物指標は現状のリサイクル資源の使用量およびリサイクル率を用いて算出した値であり、リサイクル資源の活用状況によっては評価値が変動することに留意する必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたっては、広島大学の室園環氏、太平洋セメント(株)の星野清一氏、平尾宙氏、上野直樹氏、内田俊一郎氏、(株)トクヤマの茶林敬司氏にも多大なご助言を頂きました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Ministry of Economy, Trade and Industry: The Guide for SDG Business Management, 2019.5
経済産業省: SDGs 経営ガイド, 2019.5
- 2) Itsubo, N.: Environmental management method orienting life cycle. From LCA to LCC and LCM-, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.43, No.5, pp.407-414, 2004.5
伊坪徳宏: ライフサイクルを指向した環境経営管理手法—LCAからLCC, LCMへ—, 計測と制御, 第43巻, 第5号, pp.407-414, 2004.5
- 3) Tokashiki, M.: Life cycle cost, Journal of the Association of Rural Planning, Vol.18, No.1, pp.66-67, 1999.6
渡嘉敷勝: ライフサイクルコスト, 農村計画学会誌, Vol.18, No.1, pp.66-67, 1999.6
- 4) Kobayashi, M., Ishizaka, K., Itsubo, N.: Lifecycle impact assessment and full cost assessment for IC package by LIME, Journal of the Reliability Engineering Association of Japan, Vol.31, No.6, pp.481-492, 2009
小林充, 石坂和明, 伊坪徳宏: LIMEを用いたICパッケージのライフサイクル影響評価とフルコスト評価, REAJ 誌, Vol.31, No.6, pp.481-492, 2009
- 5) Koseki, Y., Itsubo, N.: A preliminary study of life cycle based cost benefit analysis for water purifier as an adaptation of climate change, Proceedings of the 12th Meeting of the Institute of Life Cycle Assessment, pp.84-85, 2017.3
小関康雄, 伊坪徳宏: 気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析, 第12回LCA学会研究発表会講演要旨集, pp.84-85, 2017.3
- 6) Koseki, Y., Itsubo, N.: A trial study of Marginal Abatement Costs Analysis for Climate Change Mitigation Strategies using Life cycle assessment, Proceedings of the 11th Meeting of the Institute of Life Cycle Assessment, pp.296-297, 2016.3
小関康雄, 伊坪徳宏: LCAを活用した気候変動緩和策の限界削減費用分析評価の一試行, 第11回LCA学会研究発表会講演要旨集, pp.296-297, 2016.3
- 7) Kirino, Y., Hoshinno, S., Chabayashi, T., Kawai, K.: Life cycle assessment of cement considering resource recycling - (Part 1) Life cycle assessment of cement using large amount wastes, Proceeding of the 72th Annual Meeting of Cement and Concrete Engineering, pp.128-129, 2018
桐野裕介, 星野清一, 茶林敬司, 河合研至: セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その1) 廃棄物多量活用セメントの環境影響評価, 第72回セメント技術大会講演要旨, pp.128-129, 2018
- 8) Kirino, Y., Kawai, K., Hirao, H., Shinmi, T.: Life cycle assessment of cement considering resource recycling - (Part 2) Integration method for wastes recycling and CO₂ emission, Proceeding of the 72th Annual Meeting of Cement and Concrete Engineering, pp.130-131, 2018
桐野裕介, 河合研至, 平尾宙, 新見龍男: セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その2) 廃棄物活用とCO₂排出の統合化手法の検討, 第72回セメント技術大会講演要旨, pp.130-131, 2018
- 9) Shinmi, T., Kirino, Y., Chabayashi, T., Kawai, K.: Life cycle assessment of cement considering resource recycling - (Part 7) Evaluation of structure considering life cycle by waste indicator, Proceeding of the 73th Annual Meeting of Cement and Concrete Engineering pp.100-101, 2019
新見龍男, 桐野裕介, 茶林敬司, 河合研至: セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その7) 構造物のライフサイクルを考慮した廃棄物指標による評価, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp.100-101, 2019
- 10) Japan Cement Association: The summary of LCI data for cement, 2019

セメント協会: セメントのLCIデータの概要, 2019

- 11) Kirino, Y., Hoshino, S., Kawai, K., Itsubo, N.: Life cycle assessment of cement considering resource recycling - (Part 10) Evaluation of cement considering environmental condition of each countries in the world, Proceeding of the 73th Annual Meeting of Cement and Concrete Engineering pp.106-107, 2019
桐野裕介, 星野清一, 河合研至, 伊坪徳宏: セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その10) 各国の環境条件を反映したセメントの評価, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp.106-107, 2019
- 12) Shibasaki, Y., Kawai, K., Kirino, Y., Shinmi, T.: Life cycle assessment of cement considering resource recycling - (Part 8) Effect of difference of weighting method on evaluation values, Proceeding of the 73th Annual Meeting of Cement and Concrete Engineering pp.102-103, 2019
柴崎悠吾, 河合研至, 桐野裕介, 新見龍男: セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その8) 重み付けの相違が各種セメントの指標値に及ぼす影響, 第73回セメント技術大会講演要旨, pp.102-103, 2019
- 13) Society of Demolition Method; New - demolition method and cost estimate, 2017
解体工法研究会: 新・解体工法と積算, 2017
- 14) Research Institute on Building Cost; Public building construction cost estimate standard - 2019 Version, 2019
建築コスト管理システム研究所: 公共建築工事積算基準 平成31年版, 2019
- 15) Japan Society of Civil Engineers; Concrete engineering series 62 Environmental impact assessment of concrete - Part 2, 2004
土木学会: コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価(その2), 2004
- 16) Construction Research Institute; Prices of construction materials and wages - February 2018 version, 2018
建設物価調査会: 建設物価 平成30年2月版, 2018
- 17) Japan Construction Machinery and Construction Association; Construction equipment ownership cost list - 2018 Version, 2018
日本建設機械施工協会: 平成30年度版 建設機械等損料表, 2018

Tatsuo SHINMI^{*1}, *Yusuke KIRINO*^{*2}, *Hiroyoshi Kato*^{*3}
and Kenji KAWAI^{*4}

^{*1} Cement Development Dept., Tokuyama Co., M.Eng.

^{*2} Central Research Laboratory, Taiheiyo Cement Co., Dr.Sc.

^{*3} Leader, Cement Development Dept., Tokuyama Co., Dr.Eng.

^{*4} Prof., Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Dr.Eng.

To achieve sustainable development goals (SDGs), corporate activities considering social and environmental aspects are required and life cycle assessment (LCA) is conducted in many companies. However, the LCA includes only environmental aspects in many cases, and evaluation using economic indicators is also necessary for decision-making in corporate activities. Recently life-cycle cost (LCC) attracts attention as an evaluation of economic aspects and it is important to comprehensively evaluate LCA and LCC in order to achieve SDGs.

The authors have so far developed a waste indicator that can evaluate the use of recyclable resources (wastes and byproducts) in cement manufacture and also an integration method for comprehensive evaluation of wastes, byproducts, and CO₂ emissions. In addition, the LCA of a concrete structure was conducted considering cement manufacture to the demolition and disposal of the structure as its life cycle. An integrated evaluation including economic indicators was also carried out by using the integration coefficients of the Life-cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling (LIME3), which has been developed in Japan. The results showed that the evaluation value for ordinary portland cement was higher than that for portland blast-furnace slag cement type B.

In the present study, the environmental impact assessment of cement and concrete was performed considering economic aspects and full cost which is the sum of LCA cost and LCC was calculated. The relationship between the LCA cost and LCC was then discussed.

The LCA costs of cement and concrete were calculated from the integration of the waste indicator and global warming indicator by using the integration coefficients of LIME3 as an economic indicator. In the calculation of the LCC, market prices were used for cement, concrete constituents, and intermediate processing and disposal of demolished concrete. Construction and demolition costs were based on the estimation standard. The full cost was calculated as the sum of the LCA cost and LCC.

As a result, for both cement and concrete, the full cost for ordinary portland cement was lower than that for portland blast-furnace slag cement type B. The LCA cost was significantly lower than the LCC for concrete. Besides, for concrete using portland blast-furnace slag cement, the increase in the ground granulated blast-furnace slag content increased the full cost of the cement.

(2021 年 2 月 5 日原稿受理, 2021 年 6 月 22 日採用決定)