

LCA手法を用いた港湾構造物の最適化設計

Optimum Design Method for Port and Harbor Structures by using Life Cycle Assessment

池田 秀文¹ 吉村 文雄² 佐藤 隆³ 芋野 智成⁴
Hidefumi IKEDA Fumio YOSHIMURA Takashi SATOU Tomonari IMONO

ABSTRACT ; In this paper, the life cycle assessment for port and harbor design was proposed, and the case study of life cycle assessment for port and harbor structures using the recycle material was performed. In case study, the environmental burdens of calorific value and CO₂ emission were used as index of assessment, where the intensity of calorific value and CO₂ emission for recycle material were set up originally. Based on the result of case study, it was clear that the proposed life cycle assessment method was applicable for port and harbor design from the viewpoint of environmental consideration. And it was confirmed that the examination in wide range area was necessary for the purpose of optimization of environmental burdens.

KEYWORD ; harbor design, life cycle assessment, recycle, transportation problem

1 はじめに

近年、地球規模での環境問題の高まりから、構造物のライフサイクルを通しての環境問題にも明確に対処するため、ライフサイクルアセスメント手法（以下LCA手法という）を導入した環境影響の評価が可能となってきた。本手法は、特に、消費財や工業製品を主とする電力、鉄鋼、化学、家電分野などで積極的に研究されてきたが、建築分野においても指針¹⁾などが整備されてきている状況にある。これらを踏まえ、本研究では、港湾構造物の設計時において適用可能なLCA手法の考え方を整理するとともに、LCA手法を用いたリサイクル材の活用による環境負荷低減効果に関する検討を試みた。また、今後は、リサイクル材の積極的な利用が見込まれる中で、リサイクル材が産業活動の副産物であり需要に基づいて生産されない資材であることから、リサイクル材の発生量が計画必要量に満たない場合が生じることも想定される。本論文では、このような状況が生じた場合に、個別の施設レベルで検討を終わらせるのではなく、広域的な視点による検討を行うことによって、真の環境負荷に対する最適化設計が実現することを述べる。

2 港湾構造物を対象としたLCA手法

2. 1 分析手法

環境インパクトを評価するにあたっては、環境カテゴリーとして一般的となっている資源消費と地球温暖化について検討することとし、それぞれの影響分析に用いる環境負荷項目として、資源消費ではエネルギー消費量、地球温暖化では二酸化炭素排出量を用いて評価を行うこととした。

-
- 1 関西国際空港株式会社 建設事務所 Kansai International Airport Co.,Ltd Construction Office
(前国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 Shimonoseki Research and Engineering Office for Port and Airport, Kyushu Regional Development Bureau, MLIT)
 - 2 国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (")
 - 3 財団法人港湾空間高度化環境研究センター Waterfront Vitalization and Environment Research Center
 - 4 中央復建コンサルタンツ株式会社 Chuo Fukken Consultants Co.,Ltd.

表-1 評価する環境問題と環境負荷項目

環境カテゴリー（環境問題）	環境負荷項目	単位
エネルギー資源消費	エネルギー消費量	cal（カロリー）
地球温暖化影響	二酸化炭素排出量	t-C（トン・シー）

また、対象構造物におけるエネルギー消費量と二酸化炭素排出量のインベントリー分析（環境負荷量の定量化）においては、産業連関分析により求めた資材や建設機械等のLCI用原単位を用いて、対象構造物の資材消費および輸送や施工に係る環境負荷量を積み上げ法により算定することとした。なお、この産業連関分析には、1995年の統合中分類（93部門）²⁾と建設分析用産業連関表の特別分類（63部門）³⁾を用いており、逆行列表には $[(I - (I - M)A)]^{-1}$ 型を使用している。また、環境影響評価におけるインパクト分析の方法については、未だ確立されたものが無いことから、ここでは環境負荷項目毎のインベントリー分析より得られた環境負荷量について、単純比較することにより評価を実施することとした。

2. 2 計測範囲

港湾構造物のライフサイクルにおける環境負荷の計測範囲は、図-1に示すとおりであり、原料の採取から廃棄に至るまでの期間に発生する環境負荷量を対象とした。ただし、港湾構造物の種類によっては、メンテナンスフリーあるいは半永久構造物の場合もあり、構造物の条件によって適宜、メンテナンスあるいは解体・廃棄の環境負荷を省略できるものとした。

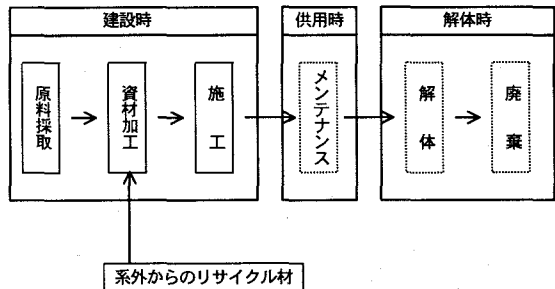


図-1 港湾構造物のライフサイクルにおける計測範囲

3 リサイクル材の適用による環境負荷低減効果

3. 1 リサイクル材の環境負荷量の設定

環境保全や持続可能な社会発展のためにリサイクル材の利用推進が謳われて久しいが、多くの技術調査や研究により、リサイクル材の港湾構造物への適用に関する技術的な課題は解決されてきている。ここでは、リサイクル材利用を検討する手段として、コストによる比較以外にLCA手法を用いることにより、リサイクル材の更なる利用促進について検討した。対象とするリサイクル材料は、表-2に示すとおり港湾構造物への適用性が大きい7種の産業副産物を取り上げ、各リサイクル材の環境負荷量（LCI用原単位）を整備した。

表-2 検討対象とするリサイクル材（産業副産物）

材 料 名	概 要
鉄鋼スラグ	徐冷スラグ 鉄鉄製造工程において、高炉内に鉄鉱石、コークス、媒溶剤を投入して吹錬したときに鉄鉱石が還元されて炉底にたまったもの
	水砕スラグ 靱性のある鋼を製造するために、高炉にて生成された鉄鉄にミルスケール等の副原料を混入して不純物と結合させ取り出したもの
	転炉スラグ ステンレス鋼などの原料であるフェロニッケルの製造時に排出されるスラグ
非鉄金属スラグ	銅スラグ 銅の精錬過程で、精錬中の鉄分と石灰石や珪石が結合して出来るスラグ
	フライアッシュ（海砂代替材） 発電所・化学工場などで石炭を燃焼させる際に微粉炭燃焼ボイラーの燃焼ガスから集塵機で採取された石灰灰
石灰灰	クリンカアッシュ 発電所・化学工場などで石炭を燃焼させる際に微粉炭燃焼ボイラーの炉底に落下採取された石灰灰

ここで、リサイクル材の利用により変化する環境負荷の様子を図-2 に示すが、一般に副産物発生者は副産物を中間処理して廃棄するまでの義務があると考え、副産物をリサイクル材として利用する事業者側がカウントすべき環境負荷の対象範囲は、中間処理された副産物を資材化すること以降であると考えることができる。

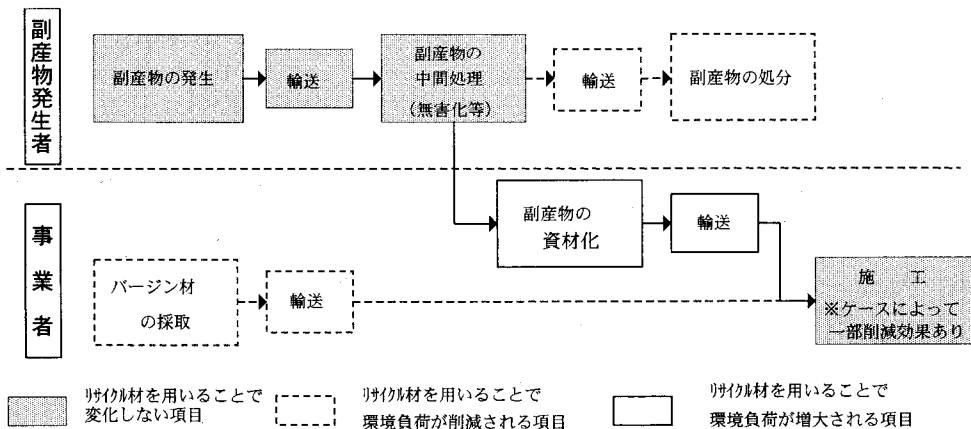


図-2 リサイクル材利用による環境負荷の変化

すなわち、リサイクル材を利用した場合の環境負荷の計測対象範囲は、副産物の「資材化」、「輸送」、「施工」となる。なお、リサイクル材利用による環境負荷低減に関して、社会的見地からは、副産物発生者における副産物の中間処理以降の「輸送」、「副産物の処分」が減少することとなるが、本研究では事業者側のみに着目することとし、前記の減少部分は検討対象範囲外とした。また、リサイクル材としての資材化における環境負荷量（LCI用原単位）は、表-3 に示す通りとなる。

表-3 リサイクル材の資材化における単位重量あたりの環境負荷量

リサイクル材		エネルギー消費量 (単位：Mcal/t)	CO ₂ 排出量 (単位：t-C/t)
製鋼スラグ	徐冷スラグ	12.2	9.5×10^{-4}
	水砕スラグ	0.0	0
	転炉スラグ	11.5	7.1×10^{-4}
非鉄金属スラグ	フェロニッケルスラグ	13.4	7.3×10^{-4}
	銅スラグ	0.1	6.8×10^{-6}
石炭灰	フライアッシュ(海砂代替材)	116.8	2.3×10^{-2}
	クリンカアッシュ	0.0	0
バージン材（砂利）		21	2×10^{-3}

なお、表-3 に示すリサイクル材の資材化における環境負荷量において、資材化工程に含まれる水砕・冷却の作業が、リサイクル材として用いず廃棄処分する際にも必要とする作業であると考え、リサイクル材としての厳密な資材化工程ではないと見なし環境負荷量に計上していない。このことにより、水砕スラグおよびクリンカアッシュでは、リサイクル材としての資材化に伴う環境負荷が発生しない結果となり、その他のリサイクル材においても概ねバージン材（砂利）の環境負荷量より小さな値を示すことがわかった。また、海砂代替材としてのフライアッシュの環境負荷量が他に比して非常に大きい値を示すのは、フライアッシュへ添加するセメントが約10%必要であることなど、投入物による影響が大きいためと考えられる。

3. 2 有効なリサイクル材の利用方法

九州地方および山口県を対象としたケーススタディを実施し、リサイクル材の有効な利用用途や利用手段について検討を行った。ケーススタディに用いた港湾構造物の概要を表-4に、リサイクル材の種類と利用用途を表-5に示す。

表-4 対象構造物の諸元

港名	施設水深	構造形式	地盤改良
A港	-7.5m	ケーソン式	SCP
B港	-10.0m	ケーソン式	SCP
C港	-12.0m	ケーソン式	SCP
D港	-7.5m	直立消波ブロック式	SCP

※SCP：サンドコンパクション工法

表-5 ケーススタディの内容（リサイクル材の利用用途）

利用用途	利用するリサイクル材
中詰材	転炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグ
裏埋材	水砕スラグ、フェロニッケルスラグ
地盤改良材（SCP）	水砕スラグ、転炉スラグ、銅スラグ

また、各港から最も近い位置にある副産物発生場所までの距離を表-6に示す。

表-6 リサイクル材の種類と各港までの海上輸送距離

リサイクル材	A港	B港	C港	D港	備考
水砕スラグ	390km※1	70km※3	120km※2	200km※3	※1:R1製鉄所、※2:R2製鉄所、※3:R3製鉄所
転炉スラグ	390km※1	70km※3	120km※2	200km※3	
フェロニッケルスラグ	510km	70km	230km	-----	R4精錬所
銅スラグ	530km	200km	120km	350km	R5精錬所
(バージン材)	100km				

これらのケーススタディの結果においては、リサイクル材を利用することによって、資材の輸送距離がバージン材使用時と比べ極端に大きくなる場合を除き、概ね環境負荷を低減できることがわかった。また、環境負荷低減に有効なリサイクル材の利用条件として、大きくは以下の4点であることが判り、特に①と②による環境負荷低減効果は顕著である傾向を示した。

①リサイクル材の利用により構造物の規模を縮小できる場合

・ケーソン中詰材に比重の大きい銅スラグ、転炉スラグ等を使用した場合はケーソンの容積を縮減することができコンクリート、鉄筋等資材の使用量が減少することから環境負荷の低減効果大きい。

②リサイクル材の輸送距離が短い場合

・資材の輸送時環境負荷は相対的に大きな比重を占めておりA港の銅スラグ、転炉スラグを使用した地盤改良のケーススタディーではリサイクル材の使用量が多くても輸送距離が相対的に長い場合環境負荷がバージン材を使用するよりも大きくなった。

③環境負荷の低いリサイクル材を用いる場合

④リサイクル材の利用量が大きい場合

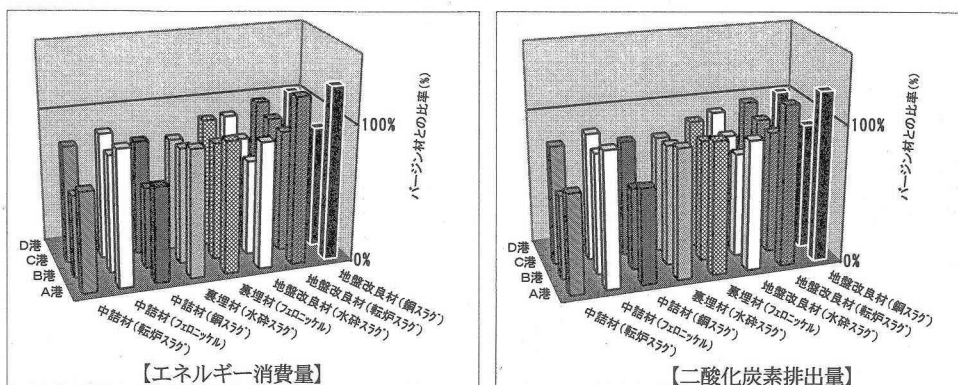


図-3 ケーススタディ結果（バージン材使用時の環境負荷量を100%としたときの比率）

4 リサイクル材利用を対象とした最適化設計

4. 1 本研究における最適化設計の考え方

地域開発、交通施設整備などの開発行為を行なう場合、与えられたいくつかの制約条件のもとに目的関数の値を最大あるいは最小化するを最適化と言うが、港湾施設の設計に適用するに際して、従来の建設コストに加えLCA手法を適用してエネルギー消費量(kcal)や二酸化炭素排出量(t-C)などの指標を加えた評価を行うことなどが考えられる。本研究では、エネルギー消費量(kcal)や二酸化炭素排出量(t-C)を最小とする最適化設計として、土木計画学でいう輸送問題の手法を用いたリサイクル材の適正配分の事例検討を行うこととした。

4. 2 リサイクル材利用を対象とした事例検討

前節の考え方をを用いて、複数の港湾施設に対して供給地が複数あるリサイクル材をどのように配分すれば、その地域にとって最適なLCA設計となるか検討した。なお、着目するリサイクル材としては、製鉄所で発生する転炉スラグを取り上げ、指標としてエネルギー消費量を用いることとした。

当該地方で転炉スラグを発生する製鉄所はR1, R2, R3の3箇所とし、各製鉄所において当年度の港湾事業に配給可能な転炉スラグ発生量および、各港までの輸送距離を表-7のとおりとする。また、A港、B港、C港、D港の4つの港においては、個別にLCA手法に基づく検討を行い、サンドコンパクションパイプ工法における砂の代替材として転炉スラグを利用することによって、環境負荷量の低減を計画しているものとする。（使用する資材の違いによる断面の変更は伴わないものとする。）各港個別の転炉スラグ必要量を環境負荷量が最小となる（運搬距離が近い）ように計画した場合の環境負荷量を表-8に示す。当該地域における製鉄所毎の転炉スラグ必要量は合計欄のとおりであり、他港との調整をすることなく同時に整備を行う場合は、R1製鉄所で240,000tの不足、R3製鉄所で240,000tの余剰が生じることとなる。

表-7 各製鉄所の転炉スラグ発生量と各港までの輸送距離

製鉄所	転炉スラグ発生量	A港	B港	C港	D港
R1製鉄所	260,000t	390km	330km	170km	200km
R2製鉄所	200,000t	530km	220km	120km	390km
R3製鉄所	480,000t	510km	70km	230km	460km

表-8 各港の転炉スラグ必要量と環境負荷が最小となる製鉄所

港 名		A 港	B 港	C 港	D 港	合 計
転炉スラグ必要量		200,000t	240,000t	360,000t	140,000t	940,000t
各港において環境負荷量が 最小となる製鉄所と計画調達量		R1 (200,000t)	R3 (240,000t)	R2 (200,000t) R1 (160,000t)	R1 (140,000t)	R1 (500,000t) R2 (200,000t) R3 (240,000t)
当初計画の転炉スラグ の環境負荷量 (エネルギー消費量)	資材の輸送	9,008,649Mcal	1,940,324Mcal	5,913,370Mcal	3,233,874Mcal	20,096,217Mcal
	資材の消費	2,300,000Mcal	2,760,000Mcal	4,140,000Mcal	1,610,000Mcal	10,810,000Mcal
	合計	11,308,649Mcal	4,700,324Mcal	10,053,370Mcal	4,843,874Mcal	30,906,217 Mcal
(参考) バージン材使用時の環境 負荷量 (エネルギー使用量)		12,285,000Mcal	7,812,000Mcal	11,718,000Mcal	4,880,400Mcal	36,695,400 Mcal

また、各港同時に施設整備が進められるものとして、環境負荷の削減のため各港の調整が行われず、仮に A 港、B 港、C 港、D 港の順に転炉スラグの調達計画が決定されていった場合の環境負荷量は表-9 に示すとおりとなる。この結果、各港における転炉スラグの環境負荷量は当初計画（環境負荷が最小となる計画）と比べ、C 港においては 692,973Mcal (7%) 増加し、D 港では 4,204,036Mcal (87%) も増加することとなった。また、当該地域での総エネルギー消費量においては 30,906,217Mcal となり、当初計画より 4,897,009Mcal (16%) の増加となった。

表-9 A 港、B 港、C 港、D 港の順に優先配分した場合の転炉スラグ量と環境負荷量 (エネルギー消費量)

港名		A 港	B 港	C 港	D 港	合 計
R1 製鉄所		200,000t	0t	60,000t	0t	260,000t
R2 製鉄所		0t	0t	200,000t	0t	200,000t
R3 製鉄所		0t	240,000t	100,000t	140,000t	480,000t
転炉スラグの 環境負荷量 (エネルギー消費量)	資材の輸送	9,008,649 Mcal	1,940,324 Mcal	6,606,343 Mcal	7,437,910 Mcal	24,993,226 Mcal
	資材の消費	2,300,000 Mcal	2,760,000 Mcal	4,140,000 Mcal	1,610,000 Mcal	10,810,000 Mcal
	合計	11,308,649 Mcal	4,700,324 Mcal	10,746,343 Mcal	9,047,910 Mcal	35,803,226 Mcal

次に、各港を含む地域レベルの総環境負荷量を考え、これが最小となる転炉スラグの各港への配分について、線形計画法の輸送問題にあてはめた検討を行った。表-10 には、各製鉄所において港湾事業に配分できる転炉スラグの量と最適解の結果を示すが、当該地域の総環境負荷量としては 33,123,730Mcal となり、表-9 に示す他港との調整を行わなかった場合に比べて、2,679,496Mcal (7%) 減じることが可能となった。

表-10 最適な転炉スラグの配分量と環境負荷量 (エネルギー消費量)

港名		A 港	B 港	C 港	D 港	合 計
R1 製鉄所		120,000t	0t	0t	140,000t	260,000t
R2 製鉄所		0t	0t	200,000t	0t	200,000t
R3 製鉄所		80,000t	240,000t	160,000t	0t	480,000t
転炉スラグの 環境負荷量 (エネルギー消費量)	資材の輸送	10,117,406 Mcal	1,940,324 Mcal	7,022,126 Mcal	3,233,874 Mcal	22,313,730 Mcal
	資材の消費	2,300,000 Mcal	2,760,000 Mcal	4,140,000 Mcal	1,610,000 Mcal	10,810,000 Mcal
	合計	12,417,406 Mcal	4,700,324 Mcal	11,162,126 Mcal	4,843,874 Mcal	33,123,730 Mcal

以上の結果から、本手法を用いることによって地域レベルでの環境負荷量を最小とする最適な配分を行うことが出来たが、当初計画通りの環境負荷低減が実施できるのは、表-8及び表-10よりB港およびD港だけとなり、A港とC港においては当初計画の環境負荷量よりも多くなる結果となる。また、図-4に示すように砂等のバージン材を使用した場合を1として比較した環境負荷の比率を見ると、A港とD港のように1.0を上回るケースもあり、その他のリサイクル材やバージン材(砂)との比較を実施する必要がある場合も想定される。

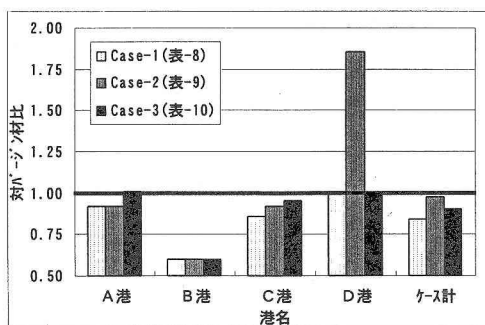


図-4 転炉スラグの配分ケース毎の環境負荷

5. 結論と課題

本論文では、港湾構造物の設計に際しても、LCA手法を用いることにより環境に配慮した検討が可能であることを示し、更にリサイクル材のLCI用原単位を整備することによって、コスト面ではなく環境面に配慮したリサイクル材の利用促進が可能であることを示した。また、リサイクル材の利用を前提とする複数の港湾施設整備が同時に行われるときは需要と供給にギャップが生じることから、リサイクル材の調達可能数量に制限がある場合は、輸送問題に当てはめた検討によって最適な各港毎の配分設計が行えることも事例を用いて示した。この事例検討の結果から、環境負荷量を地域レベルで最小とするためには、各港の個別のレベルでLCA手法による検討を終わらせるのではなく、広域的な視点で検討を行うことが重要であることが判った。

更に、これらの手法を構築することによって、地球環境の観点からみた断面検討のみならず、整備時期の検討等も含む建設マネジメントに対しても、有力な手法になるものと考えられる。

なお、本論文では産業副産物を対象とした幾つかのリサイクル材のLCI用原単位を示したが、建設副産物を含む多くのリサイクル材のLCI用原単位についても順次拡充を図る必要があるといえる。更に、環境負荷項目について本論文では「エネルギー消費量」と「二酸化炭素排出量」のみに着目したが、今後においてはISOの動向なども念頭に環境負荷項目の整備が必要である。また、適用事例を増やすことによって、より精度の高い手法の充実も図れると考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物のLCA指針（案）～地球温暖化防止のためのLCCO₂を中心として～，1999.
- 2) 総務庁：平成7年産業連関表，平成11年5月.
- 3) 建設調査統計研究会編集：平成7年建設部門分析用産業連関表，建設物価調査会，平成12年3月.
- 4) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編：総合エネルギー統計（平成8年度版），1997.
- 5) 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所：港湾整備におけるLCA手法導入調査 報告書，平成13年3月.
- 6) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：ライフサイクルアセスメント手法を導入した環境影響評価手法開発調査 報告書，平成9,10,11年.
- 7) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：環境負荷量を考慮したリサイクル材の利用促進検討調査 報告書，平成12年3月.
- 8) 運輸省第四港湾建設局リサイクルWG：建設副産物・再生資源の取扱いに関するガイドブック，1999.