

# 岸壁ケーソン工事における リサイクル材使用の LCA

## LIFE CYCLE ASSESSMENT ON CONSTRUCTIONS OF CAISSON ADOPTING RECYCLED MATERIAL

鶴谷 広一<sup>1</sup>・尾島 啓介<sup>2</sup>・小林 和幸<sup>3</sup>・  
清宮 理<sup>4</sup>・山縣 延文<sup>5</sup>

Hiroichi TSURUYA, Keisuke OJIMA, Kazuyuki KOBAYASHI,  
Osamu KIYOMIYA and Nobufumi YAMAGATA

<sup>1</sup>フェロー 工博 東海大学 海洋研究所 教授 (静岡県清水市折戸 3-20-1)

<sup>2</sup>正会員 財団法人 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員 (東京都千代田区隼町 3-16)

<sup>3</sup>国土環境株式会社 ISO 推進室 部長 (東京都世田谷区駒沢 3-15-1)

<sup>4</sup>フェロー 工博 早稲田大学理工学部土木工学科 教授 (東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>5</sup>正会員 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所長 (山口県下関市東大和町 2-29)

Catching environmental load of port structures throughout life-cycle is a social-necessity in Japan where a lot of port constructions have been planed and carried out. Also, use of recycled material is demanded for the constructions in the landfill shortage situation. This paper tries to calculate environmental load, - CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, and Energy in this paper -, of port structures constructed by four different materials. Caission is made up of first material in case A0, converter slag in case A1, ferronickel slag in case A2, and copper slag in case A3. Each case shows a similar trend, but case A1 and A3 has lower environmental load than case A0 and A2 does. In the calculation of CO<sub>2</sub>, this paper tries to identify the processes that produce high environmental load, and reveal relations between the transport distance of recycled material and the amount of discharged CO<sub>2</sub>.

*Key Words : LCA, recycled material, port structures, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, transport distance*

### 1. 緒言

LCA(Life cycle assessment)とは、製品の持つ一生(資材採取からリサイクル・廃棄まで)の環境負荷量、環境への影響度を評価する手法である。ISOは、環境マネジメントの支援技法であるLCA規格の第1号として、1997年にISO14040を発行しており、わが国でも既に工業製品分野や廃棄物処理分野などでLCAに関するさまざまな取り組みがなされている。

港湾分野においても、地球温暖化や廃棄物等の対策が求められている中で、構造物の計画・設計の段階でも環境負荷への配慮が必要となってきた。そこで、本研究では港湾の護岸を対象として、ケーソン構造の護岸にリサイクル材を用いた場合のライフサイクルを通じた環境への負荷の評価を行った。

これまでにも、港湾構造物のLCAとして、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>排出量、およびエネルギー消費量についての検討はいくつか報告されている。しかし、その

他の環境負荷項目に関する研究例は少ない。港湾構造物の環境負荷を総合的に評価するためには、その他の負荷量を把握する必要があると思われる。これより環境負荷項目をCO<sub>2</sub>、エネルギーに加え、大気汚染物質であるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>も評価の対象とした。評価対象は、岸壁ケーソン中詰材が異なるケーススタディとした。通常、ケーソンの中詰材としては、砂や砂利が用いられる。しかし、これらは天然の材料であり、近年環境破壊を抑制する意味から海砂の採取が難しくなるなど、代替材の使用が検討されるようになってきている。その意味で、産業副産物である鉄鋼スラグや非鉄金属スラグなどを用いることができれば、港湾の分野でも循環型社会の形成に対する積極的な寄与ができるものと考えられる。その評価の一つとして、LCAを用いることを試みた。評価範囲は資材生産・輸送から建設時までとした。

## 2. 算出方法

港湾構造物の環境負荷量算出に LCA 手法を用いて算出を行なった。本研究で使用した設定条件を示す。

### (1) 評価対象

リサイクル材を使用する港湾構造物建設のライフサイクルアセスメントのケーススタディとして、K 港岸壁ケーソン(幅 20m のケーソン式-7.5m 岸壁, 延長 130m)を評価対象とした。評価対象は、既存事例<sup>1)</sup>を参考とした。対象ケースの構造形式、リサイクル材の利用用途、材料を表-1 に、これらの資材輸送距離および使用量を表-2 に示す。また図-1 には K 港の標準断面図を示す。資材の輸送は、ガット船による海上輸送とし、バージン材は、50km, リサイクル材は、現場から最も近いリサイクル材発生場所からの距離を用いた。

表-1 評価対象

ケース	構造形式	利用用途	リサイクル材
CASE_A0	ケーソン -S.C.P	中詰材	バージン材 (砂利)
CASE_A1			転炉スラグ
CASE_A2			フェロニッケルスラグ
CASE_A3			銅スラグ

表-2 資材輸送距離および使用量

資材	輸送距離 ( km )	使用量 ( t )
バージン材 (砂利)	50	$4.47 \times 10^3$
転炉スラグ	390	$3.79 \times 10^3$
フェロニッケルスラグ	510	$4.47 \times 10^3$
銅スラグ	530	$3.92 \times 10^3$

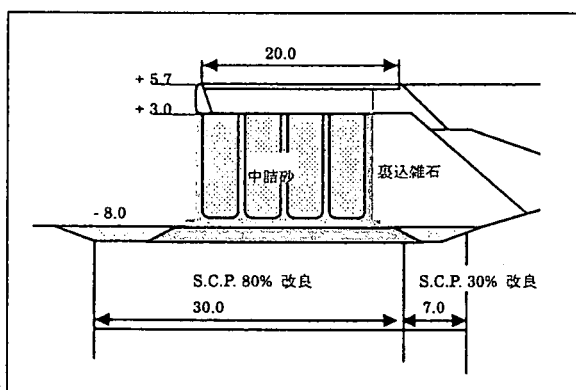


図-1 K 港標準断面図 (単位 m)

### (2) システム境界

システム境界とは、LCA を実施する際の調査範囲を示す。これまでの港湾構造物の LCA 調査により建設時までの環境負荷が大半を占めているという報告<sup>2)</sup>がある。これより、負荷の大半を占めている資材の調達、輸送から建設時までをシステム境界内とした。今回の検討では、岸壁ケーソンのメンテナンス、および廃棄の工程はシステム境界外とした。また輸送、施工に用いられる建設重機の製造段階は、その寄与率が小さいと考えられること、各ケースで同様に使用されることからシステム境界外とした。

### (3) 原単位データ

各環境負荷のインベントリは、「Σ (各プロセスにおける使用量×原単位)」から算出される。本試算に用いた原単位データは、基本的に JEMAI-LCA (資源環境総合研究所開発) に組み込まれているデータを採用した。JEMAI-LCA に存在しない資材については、次の優先順位で入手した。

#### ① 産業連関表の原単位使用

本研究で用いた産業連関表は、LCA 支援ソフトである EASY-LCA (東芝) のデータを使用した。

#### ② 対象の項目に使用された電力量、燃料から間接的に算出。(リサイクル材に使用)

次に主な原単位について述べる。

資材；

岸壁ケーソンに使用されている資材としては、砂利、コンクリート、鉄筋、銅スラグ、フェロニッケルスラグ、転炉スラグが挙げられる。砂利、コンクリート、鉄筋の原単位は、EASY-LCA を用いた。ただし、リサイクル材については、資材製造過程での使用電力、燃料から JEMAI-LCA の原単位を用いて間接的に算出した。

輸送；

使用燃料からの負荷量は、ケーススタディで示された燃料使用分から算出した。使用したデータは、JEMAI-LCA からのもので、燃料製造と排出ガスを考慮している。

### (4) 使用データ

各ケースに用いられた燃料、資材の使用量は、既往事例<sup>1)</sup>を参考とした。各ケースの工事数量算出は下記のように算出されている。

- ・ 中詰材にリサイクル材を用いた場合は、資材の単位体積重量によりケーソンの幅が変わることから安定計算を実施し、本土工数量も断面に併せて変更している。
- ・ 地盤改良がある場合については、改良幅についてのみ安定計算の実施によるケーソン幅の増減率をバージン材における改良幅に乗じた値を用いる。

リサイクル材を用いる事によりケーソン幅に違いが生じ、各ケースでの工事量は異なる。これより、CASE-A0～A3 の 4 ケースを比較することは、中詰材にリサイクル材を用いることによって、岸壁ケーソンのライフサイクルでの環境負荷量がどのように異なるかを評価することができる。

また、図-2 に本研究における検討フローを示す。

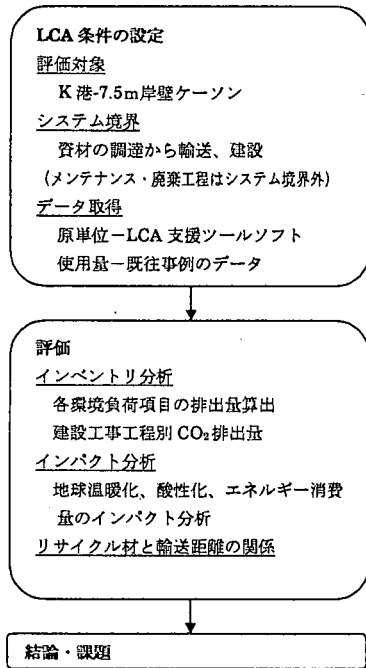


図-2 検討フロー

### 3. 検討結果と考察

上記の条件でリサイクル材を用いた場合の港湾事業のライフサイクルを通じた環境負荷の評価を行なった。評価項目は、次の4つである。

- ① インベントリ分析 (CO<sub>2</sub>・NOx・SOx の排出量、およびエネルギー消費量)
- ② 建設工事工程別の CO<sub>2</sub> 排出量
- ③ インパクト分析 (地球温暖化・酸性化・エネルギー消費の特性化に基づくインパクト評価)
- ④ リサイクル材の輸送距離に基づく環境負荷量の検討

#### (1) インベントリ分析

各ケースのライフサイクルを通じた CO<sub>2</sub>, NOx, SOx の排出量, エネルギー消費量の算出を行なった。算出方法は、各ケースで使用された資材, エネルギーに、その項目に対応した原単位を乗じ、全項目を積算する。算出結果を表-3 に示す。また CO<sub>2</sub>, NOx, SOx についてグラフ化したものを図-3 に示す。

表-3 各ケースのライフサイクルにおけるインベントリ分析結果

	CASE_A0	CASE_A1	CASE_A2	CASE_A3
energy MJ	3.4E+06	3.1E+06	4.2E+06	3.2E+06
CO <sub>2</sub> t	687	519	678	514
NOx kg	2.3E+03	2.0E+03	2.7E+03	2.2E+03
SOx kg	494.6	384.0	492.8	391.5

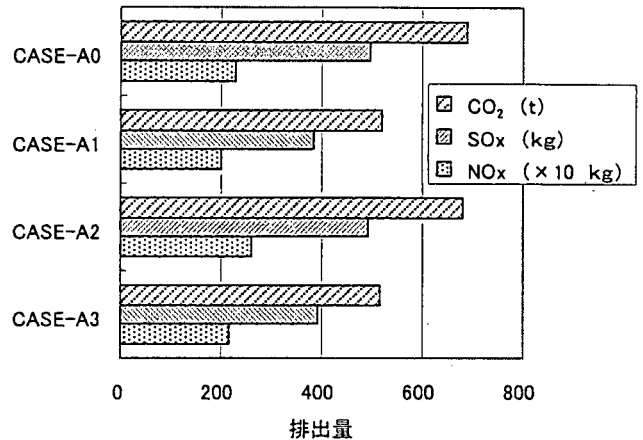


図-3 各ケースのライフサイクルにおける大気汚染物質排出量

各排出量の傾向は、CASE-A0, A2 > A1, A3 と、NOx, SOx も CO<sub>2</sub> と同じであることが示唆された。このような排出傾向を示した原因としては、工事数量の違いが挙げられる。リサイクル材によって設計が異なり、その工事数量が変化する。これよりリサイクル材を採用する場合でも工事数量が少ない CASE-A1, A3 が有効であると考えられる。

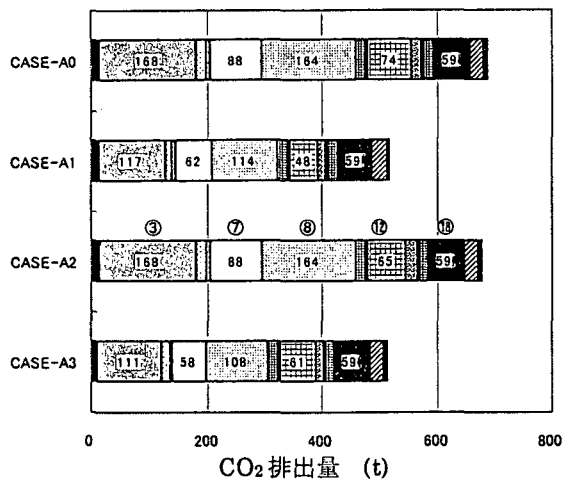
CASE-A2 は、フェロニッケルスラグを使用しており、その重量が小さいことから、施工量が他のケースより多くなる。そのため全体的に環境負荷が大きくなるといった結果になった。また、フェロニッケルスラグの単位重量あたりの資材化工程、および輸送距離による負荷の大きさが影響している。

#### (2) 建設工事工程別の CO<sub>2</sub> 排出量

各ケースにおいてどの工程が、ライフサイクルを通しての排出量に大きく寄与しているかの評価を行なった。この評価には、環境負荷項目の代表として CO<sub>2</sub> を対象とした。図-4 に各ケースの建設工事工程別の CO<sub>2</sub> 排出量を示す。

これよりいずれのケースにおいても締固砂杭打込、ケーソン製作 (FD) 鉄筋工、ケーソン製作 (FD) コンクリート打設、中詰材投入の寄与が大きいことが分かった。効率の良い CO<sub>2</sub> 削減方法を検討する場合には、これらの工程から改善方法を模索していくことが必要である。またより正確な評価をしていくためには、これらの工程に使用される資材量およびエネルギー消費量のデータが、慎重に収集されるべきであると

考えられる。



- 1 床礎(N10未満)
- 2 置換材投入
- 3 締固砂杭打込
- 4 捨石投入
- 5 捨石本均し(水中)
- 6 捨石荒均し(水中)
- 7 ケーソン製作(FD)鉄筋工
- 8 ケーソン製作(FD)コンクリート打設
- 9 ケーソン製作(FD)
- 10 ケーソン透水
- 11 ケーソン撤付(ウィンチ)
- 12 中詰め材投入
- 13 蓋コンクリート打設(クレーン)
- 14 足場工
- 15 鉄筋工
- 16 型枠工
- 17 コンクリート打設
- 18 蓋込材投入(海上)
- 19 蓋込均し(水中)
- 20 吹出し防止工(海上)
- 21 蓋埋材投入
- 22 路床整地仮圧
- 23 路盤材敷均し転圧
- 24 コンクリート舗設
- 25 公海上

図-4 各ケースの工程別CO<sub>2</sub>排出量(t)

表-4 感度分析結果

順位	要素名称	感度
1	重油	0.33
2	生コンクリート	0.32
3	鉄筋	0.14
4	砂利	0.11
5	サンドコンパクション船(燃料)	0.04

上記のCO<sub>2</sub>排出量の高い工程の原因は、これらの工程で多くの資材を使用していることにある。これは、岸壁ケーソンの感度分析結果から示すことができる。感度分析をすることによって、対象要素が全体の排出量にどれだけ寄与しているかを導き出すことができる。ここでの感度とは、CO<sub>2</sub>総排出量変動率をデータの変動率で割った値と定義する。各要素感度は、CO<sub>2</sub>排出への寄与の大きさの指標となり、大きな値を示す要素ほど負荷量に寄与することを示す。

岸壁ケーソン施工(CASE-A0)の各要素に対する感度の高い5要素について表-4に示す。一番感度の高い要素は重油であった。これは、建設時の機材の燃料に使用されている。2, 3, 4位は資材である。これより燃料である重油、および各資材の感度が高く、CO<sub>2</sub>

排出量に大きく寄与していることが分かる。

改善策を模索する上で、これらの資材・燃料の使用量削減および、原単位の小さな資材の選定が有効であると思われる。

### (3) インパクト評価

インベントリ分析結果から、インパクト評価を行なった。インベントリ分析により得られた各環境負荷項目の排出量は、それぞれ環境に対するインパクト(影響力)が異なる。これより各項目を単純に比較することができない。インパクト分析はこれらの評価を行なうために、インベントリ分析結果をカテゴリに分類し、それぞれの負荷量を規格値で除し、正規化することによって無次元の値とする。規格値は、対応するカテゴリの日本における総排出量(JEMAI-LCAのデータ)である。こうして正規化・特性化することにより、比較検討が可能となる。

本研究ではカテゴリを、地球温暖化、酸性化、エネルギー消費とし、インパクト評価を行なった。用いた特性化係数と、特性化・正規化を行なった結果を表-5に示す。またグラフ化したものを図-5に示す。

地球温暖化の特性化係数は、CO<sub>2</sub>を基準物質とした温暖化への寄与率を示すGWP(Global Warming Potential)を用いた。また酸性化の特性化係数には、SO<sub>2</sub>を基準物質とした酸性化への寄与率を示すAP(Acidification Potential)を使用した。

表-5 インパクト分析結果

インパクトカテゴリ	特性化係数	正規化結果			
		CASE-A0	CASE-A1	CASE-A2	CASE-A3
地球温暖化	GWP (CO <sub>2</sub> =1)	5.0E-07	3.9E-07	5.1E-07	3.9E-07
	Eco95				
酸性化	AP (SO <sub>2</sub> =1)	8.3E-07	8.1E-07	1.1E-06	8.6E-07
エネルギーの消費	MJ	1.8E-07	1.6E-07	2.1E-07	1.7E-07

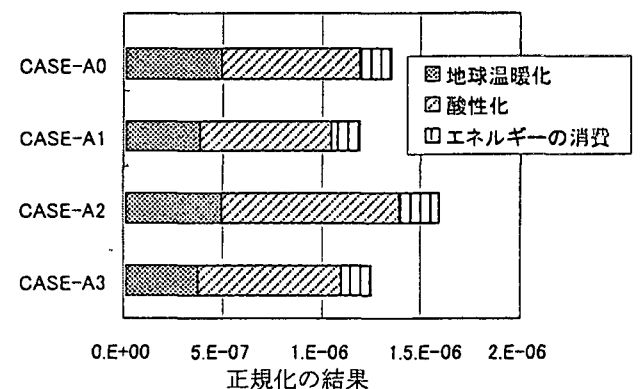


図-5 各ケースのインパクト分析結果

特性化・正規化を行なう前と比較して、大きな傾向の変化は認められなかった。しかし、環境負荷項目の

インベントリを個々で見た場合 CASE-A0 と CASE-A2 がほぼ同程度であったのに対し、正規化後の値は、CASE-A2 と CASE-A0 の差が大きくなった。これは、酸性化への寄与の高い SOx が、CASE-A0 に比べ、より CASE-A2 の排出量が大きかったことに由来する。これは酸性化へのインパクト(影響)が、地球温暖化への影響より大きかったためである。

#### (4) リサイクル材の輸送距離に基づく環境負荷量の検討

リサイクル材を用いることによる環境負荷増大の原因の 1 つである輸送について評価を試みた。ここでは環境負荷項目の代表として CO<sub>2</sub> の排出量を取り上げた。リサイクル材の製造所は、多く存在しないことからリサイクル材調達に要する輸送距離の多くはバージン材より長くなる。輸送距離が長くなることにより、CO<sub>2</sub> 排出量が増加する。そこで、輸送距離と CO<sub>2</sub> 排出量の関係を示し、バージン材使用ケースの排出量を超える各ケースの輸送距離を見出した。

図-6 に各ケースの輸送距離とライフサイクルを通しての CO<sub>2</sub> 排出量の関係を示す。

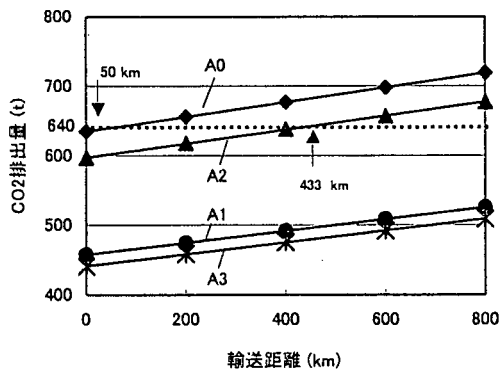


図-6 ライフサイクルにおける CO<sub>2</sub> 排出量と輸送距離の関係 (1 ケーソンあたり)

バージン材 (CASE\_A0) を使用する場合の輸送距離を 50km とし、そのライフサイクルにおける CO<sub>2</sub> 排出量は、640t である。CASE\_A1、A3 は、2144km、2344km 以内の輸送距離であればバージン材を使用したケースの排出量より小さい値となる。一方 CASE\_A2 では、その輸送距離が 433km を超えると、バージン材を使用したケースより排出量が大きくなると算出された。

CASE\_A2 を採用する場合は、輸送距離 433km 以内の調達が見込めると考えられる。評価対象である K 港では、CASE\_A2 を選択した場合 433km 以内で資材が調達可能な製造所は存在しない。

## 4. 結言

リサイクル材を用いた港湾構造物建設における、ライフサイクルアセスメントのケーススタディを試みた。岸壁ケーソンを評価対象として、中詰材にリサイクル材を用いた場合の評価を行なった。本研究より次の結果が得られた。

- ① NOx, SOx の各ケースの排出量は、CO<sub>2</sub> の排出パターンと類似していた。
- ② 建設工事工程別の CO<sub>2</sub> 排出量は、どのケースでも締固め砂杭打込、ケーソン製作、コンクリート打設、中詰材投入の寄与が大きいと算出された。これは、この工程で多くの資材を用いる事に由来する。削減対策を検討する場合、これらの工程を改善するのが有効と考えられる。
- ③ 地球温暖化・酸性化・エネルギー消費の特性化・正規化に基づくインパクト評価では、酸性化 > 地球温暖化 > エネルギー消費の順となった。
- ④ リサイクル材の輸送距離と CO<sub>2</sub> 排出量の関係からバージン材使用ケースの排出量を超える輸送距離を 433km と算出した。資材調達の際に LCA を用いることで、その調達方法を選択基準の 1 つとして用いる事が出来ると思われる。

また、問題点と今後の課題を次に示す。

- ① 現時点では、資材 (砂利、鉄筋、コンクリート等) の原単位に産業連関表を用いている。これらのデータは、感度分析により感度が高いと評価された項目である。より精度の高い評価を行なうためには、これらのデータを慎重に入手することが望ましい。
- ② 今回の算出は、インパクトカテゴリを地球温暖化・酸性化・エネルギー消費としたが、コストを含めより港湾事業に必要と思われるカテゴリの追加が必要と思われる。
- ③ 今後リサイクル材をより一層使用していくためには、リサイクル材使用のメリットを評価することができる手法を開発することが有効である。

## 参考文献

- 1) 平成 12 年度 港湾整備における LCA 手法導入調査報告書, 国土交通省 九州地方整備局, 2001.
- 2) 平成 12 年度 港湾事業ライフサイクル・アセスメント (LCA) に関する自主研究報告書, 財団法人 沿岸開発技術研究センター, 2001.
- 3) LCA 実務入門, 社団法人 産業環境管理協会, 1998.
- 4) 建設の LCA, 井村秀文, オーム社, 2001.