

# 論文 コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討

樋口雅也\*1 河合研至\*2

**要旨:** 実際のコンクリート構造物のライフサイクルにおける環境負荷を, CO<sub>2</sub> 排出量, 廃棄物量から総合的に評価した。その結果, 建設資材の製造に伴う環境負荷が圧倒的に大きく, 次いで施工に伴う環境負荷が比較的大きいことがわかった。また, DtT (Distance-to-Target) 法やエココストなどの手法を用いることにより, 環境負荷の統合化が可能であることが明らかとなった。

**キーワード:** コンクリート, 環境負荷, CO<sub>2</sub> 排出量, 廃棄物量, リサイクル

## 1. はじめに

コンクリート構造物を建設し, 修繕と改修を繰り返しながら最後に取り壊すまでのライフサイクルを通じて, 多くの資源とエネルギーを消費している。その結果として, CO<sub>2</sub> や廃棄物などの環境負荷を地球環境という閉じた空間に拡散させていることになる。しかし, 環境負荷を処理する地球環境容量にも限界がある。

そこで, 環境負荷低減を検討するために, ライフサイクルを通じてコンクリート構造物の環境負荷を評価することが必要である。

本研究では実際のコンクリート構造物を取り上げ, ライフサイクルを通じてのコンクリート構造物の環境負荷を総合的に評価し, その結果を基に環境負荷低減について検討した。

## 2. ケーススタディ

### 2.1 対象構造物と環境負荷評価の概要

本研究では, 広島県内にある橋長 32m の PC 道路橋を環境負荷評価の対象構造物とした。架け替えに伴う工事が評価の対象となる。設計条

表 - 1 設計条件

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
構造形式	ポストテンション方式PC単純T桁橋
設計荷重	B活荷重
橋長	32m
有効幅員	車道:6.75m, 歩道:2.5m

件の概要を表 - 1 に示す。コンクリート及び鋼材を用いたときの資材の製造, 運搬, 施工, 解体, リサイクルまでの CO<sub>2</sub> 排出量と廃棄物量について検討を行った。舗装ならびに供用時の電力消費, 舗装の張替等は考慮していない。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 排出量算出の概要

#### (1) CO<sub>2</sub> 原単位

建設資材, 機械消耗, 燃料等の CO<sub>2</sub> 原単位は, 土木学会「土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会講演要旨集, 1997」に記載されている CO<sub>2</sub> 排出量原単位の奨励値を使用した。使用した原単位を表 - 2<sup>1)</sup> に示す。

#### (2) 重機の時間あたりの CO<sub>2</sub> 排出量

重機使用による CO<sub>2</sub> 排出量は燃料 (軽油) の消費による排出量と使用機械の消耗による排出量からなり, この 2 つの合計値を用いることとした。使用建設重機の時間あたりの CO<sub>2</sub> 排出量としては, 表 - 3<sup>1)~3)</sup> に示す値を使用した。

燃料消費による CO<sub>2</sub> 排出量では, 時間当たりの軽油使用量と軽油の原単位を乗じて燃料消費による時間当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を算出した。時間あたりの軽油使用量は建設機械等損料算定表の各重機の機械出力に建設省土木工事積算基準に記載されている各重機の時間あたりの燃料消費率を乗じて算出した<sup>2), 3)</sup>。

使用重機の消耗による CO<sub>2</sub> 排出量では, 建設機械等損料算定表に記載されている各重機質量

\*1 広島大学学部生 工学部第四類 (建設・環境系) (正会員)

\*2 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

に、時間当たりの消耗比率（損料率）、土木学会 LCA 小委員会の推奨する建設機械類の原単位 5.57kg-CO<sub>2</sub>/kg を乗じて使用重機の消耗による時間当たりの排出量を算出した<sup>2), 3)</sup>。

### (3) 資材の製造・運搬

資材製造の際に排出される CO<sub>2</sub> 量は、資材の質量に原単位を乗じて算出した。資材の質量については、入手した工事施工計画書の施工数量表から求めた。

運搬時の CO<sub>2</sub> 排出量は、建設資材運輸の原単位に往復距離と資材質量を乗じて算出した。

### (4) 施工

生コンクリート製造については、生コンプラントにおけるコンクリート 1t 製造あたりの CO<sub>2</sub> 排出量 (7.84kg-CO<sub>2</sub>)<sup>4)</sup> にコンクリート質量を乗じて求めた。コンクリートの質量は材料一覧表のレディーミクストコンクリート配合報告書

から求めた。

建設重機、発動発電機の稼働に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は、それぞれの稼働時間に時間あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を乗じて算出した。稼働時間は工事施工計画書の施工工程表と工事日報から稼働日数を割り出し、1日の稼働時間を発動発電機は4時間、アジテータトラックは3時間、その他の建設重機は7時間と仮定し求めた。

### (5) 解体

解体時には、鉄筋コンクリートの解体にバックホウ (0.6m<sup>3</sup>) とコンクリート粉砕機 (56~100 t)、鉄筋の切断に溶接機、解体されたコンクリートの集積・積み込みにバックホウ (0.6 m<sup>3</sup>) をそれぞれ重機として使用すると仮定した。鉄筋コンクリート 1m<sup>3</sup> あたりの解体、鉄筋切断に伴う CO<sub>2</sub> 排出量、解体されたコンクリート 1 m<sup>3</sup> あたりの集積、積み込みに伴う CO<sub>2</sub> 排出量を表 - 4<sup>5)</sup> に示す。

### (6) リサイクル

解体されたコンクリートは現場内で、自走式再生処理機により再生粗骨材 3 種及び再生細骨材 2 種相当の骨材としてリサイクルすることにした。自走式再生処理機 (処理能力 35~85 t/h) によりコンクリート 1 t あたりを処理するときの CO<sub>2</sub> 排出量を表 - 4 に示す。

## 2.3 CO<sub>2</sub> 排出量の計算結果

### (1) 資材製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量

資材製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を表 - 5 に、資材別 CO<sub>2</sub> 排出量の割合を図 - 1 に示す。ここで、鉄筋の原単位には電炉製鋼棒・型鋼の値を、PC

表 - 2 使用した CO<sub>2</sub> 原単位<sup>1)</sup>

分類項目	CO <sub>2</sub> 原単位
砂利・採石	0.00565kg-CO <sub>2</sub> /kg
ポルトランドセメント	0.836kg-CO <sub>2</sub> /kg
高炉スラグ45%混入	0.495kg-CO <sub>2</sub> /kg
高炉製熱間圧延鋼材	1.507kg-CO <sub>2</sub> /kg
電炉製鋼棒・型鋼	0.46933kg-CO <sub>2</sub> /kg
軽油	2.856kg-CO <sub>2</sub> /L
天然ガス(LNG)	2.453kg-CO <sub>2</sub> /kg
液化天然ガス(LPG)	3.183kg-CO <sub>2</sub> /L
電力	0.473kg-CO <sub>2</sub> /kWh
建設機械類	5.573kg-CO <sub>2</sub> /kg
運輸	0.341kg-CO <sub>2</sub> /t·km

表-3 建設重機の時間あたりの CO<sub>2</sub> 排出量<sup>1)~3)</sup>

建設重機	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /時)
トラッククレーン(15t, 油圧式)	48.4
トラッククレーン(20t, 油圧式)	67.1
トラッククレーン(60t, 油圧式)	102
コンクリートポンプ	71.5
アジテータトラック (4.5m <sup>3</sup> )	51
発動発電機 (20KVA)	9.9

表 - 4 解体時、再生骨材製造時の CO<sub>2</sub> 排出量<sup>5)</sup>

	燃料消費量	CO <sub>2</sub> 排出量
鉄筋コンクリート解体	軽油5.6L/m <sup>3</sup>	16kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
鉄筋切断	アセチレンガス 0.22kg/m <sup>3</sup>	0.74kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
コンクリートの集積・積み込み	軽油3.0L/m <sup>3</sup>	8.57kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
自走式再生処理機 (再生骨材製造)	軽油0.488L/t	1.39kg-CO <sub>2</sub> /t

鋼材の原単位には高炉製熱間圧延鋼材の値を使用した。セメント製造時のCO<sub>2</sub>排出量は62%と他の資材に比べて極めて大きいことがわかる。また、PC橋の主要材料であるセメント、骨材、鉄筋、PC鋼材で全体の85%を占めている。

### (2) 資材運搬に伴うCO<sub>2</sub>排出量

表-6に各資材の使用数量、運搬往復距離、CO<sub>2</sub>排出量を示す。数量が少なくても、神奈川県や岐阜県などの遠方からの調達資材がCO<sub>2</sub>排出量を大きく引き上げていることがわかる。

### (3) 施工に伴うCO<sub>2</sub>排出量

表-7に建設重機の使用時間とCO<sub>2</sub>排出量を示す。コンクリート量は548tであるので、生コンプラントでコンクリートを製造するときのCO<sub>2</sub>排出量は4299kg-CO<sub>2</sub>となる。したがって、

施工に伴うCO<sub>2</sub>排出量は31542kg-CO<sub>2</sub>となる。

### (4) 解体に伴うCO<sub>2</sub>排出量

解体する鉄筋コンクリート量は240m<sup>3</sup>であるが、解体された量はかさ密度を考慮し、コンクリート量に1.41を乗じた399m<sup>3</sup>とし計算した。解体時のCO<sub>2</sub>排出量を表-8に示す。

### (5) 再生骨材製造に伴うCO<sub>2</sub>排出量

鉄筋コンクリート構造物解体後に発生する鉄筋(鉄くず)については、そのまま有価物として引き取られるとする。解体されたコンクリートの質量は546tである。このコンクリートを使って、再生骨材を製造する時の二酸化炭素排出量は759kg-CO<sub>2</sub>となる。

表-5 資材製造のCO<sub>2</sub>排出量

資材名	数量(kg)	原単位(kg-CO <sub>2</sub> /kg)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )
ポルトランドセメント	94500	0.836	79002
高炉セメントB種	11573	0.495	5729
粗骨材	248249	0.00565	1403
細骨材	156838	0.00565	886
鉄筋	34495	0.4693	16189
PC鋼材	7755	1.507	11687
その他の資材(合板型枠、合成ゴム、防護柵、排水装置など)			20966
	合計		135862

表-6 資材運搬時のCO<sub>2</sub>排出量

建設資材	数量(t)	往復距離(km)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )
コンクリート	548	30	5606
鉄筋	7.821	160	427
鉄筋	26.694	220	2002
PC鋼棒	7.755	520	1375
シーす	0.614	640	134
定着具	1.5	1800	920
型枠	0.941	100	32
防護柵	1.36	120	56
保護カバー	3.25	100	111
合成ゴム	0.112	1100	42
アンカーバー	0.354	1100	133
落橋防止装置	0.839	1100	315
排水装置	0.107	180	7
	合計		11160

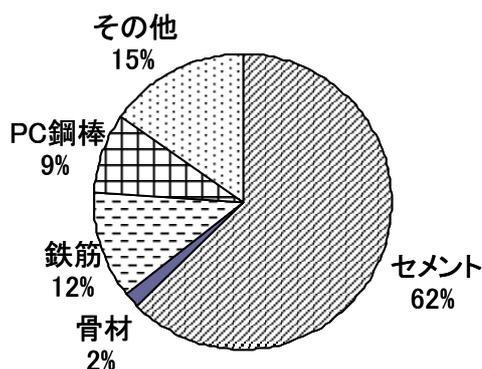


図-1 資材別CO<sub>2</sub>排出量の割合

表-7 建設重機によるCO<sub>2</sub>排出量

建設重機	総使用時間(h)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )
トラッククレーン15t	58	2807
トラッククレーン20t	192.5	12917
トラッククレーン60t	21	2142
コンクリートポンプ	28	2002
アジテータトラック(4.5m <sup>3</sup> )	105	5355
発電機(20KVA)	204	2020
	合計	27243

## (6) ライフサイクルのCO<sub>2</sub>排出量

図-2にライフサイクルのCO<sub>2</sub>排出量の割合を示す。ここでは、上部工のみを対象とし、舗装ならびに供用時のCO<sub>2</sub>排出量は考慮していない。対象構造物における範囲では、資材製造や施工の部分においてCO<sub>2</sub>排出量削減を図ることがライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>排出量削減に効果的であることがわかる。

### 2.4 廃棄物量の計算結果

#### (1) 廃棄物リサイクル

セメントの原・燃料として種々の廃棄物が活用されている。表-9<sup>6)</sup>に各セメント1tあたりの廃棄物リサイクル量を示す。ポルトランドセメント94500kg、高炉セメントを11573kg使用しているので、10908wet-kgの廃棄物リサイクルがなされていることとなる。

#### (2) 廃棄物発生量

コンクリート廃材は場内処理によって再生骨材となることを想定しているため、コンクリート廃材の廃棄物発生はないと考える。

表-8 解体時のCO<sub>2</sub>排出量

作業	コンクリート量(m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )
鉄筋コンクリート解体	240.4	3801
鉄筋切断		178
コンクリートの集積・積み込み	399	2871
合計		6850

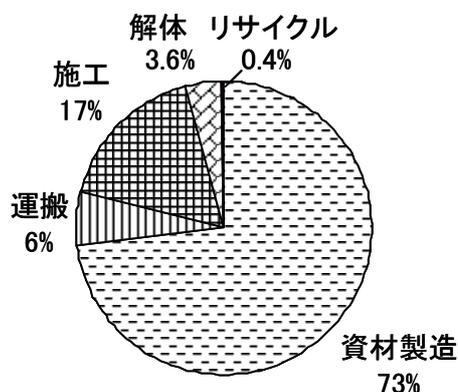


図-2 ライフサイクルのCO<sub>2</sub>排出量の割合

## 3. 橋長による比較

### 3.1 CO<sub>2</sub>排出量の比較

著者らがこれまでに検討を行った橋長85mのPC橋(ポストテンション方式、PC3径間中空床版橋)<sup>7)</sup>のCO<sub>2</sub>排出量とここで算出した橋長32mのCO<sub>2</sub>排出量の比較を表-10に示す。資材製造、運搬、施工について計算を行い、資材製造については、セメント、骨材、PC鋼材、鉄筋製造時のCO<sub>2</sub>排出量、施工については、トラッククレーン15t、トラッククレーン20t、コンクリートポンプ、発動発電機のみをCO<sub>2</sub>排出に関して考慮した。

橋長の増大に伴い施工が合理的となることから全体に占める施工時のCO<sub>2</sub>排出量の割合が橋長85mの場合に低下し、反面、全体に占める資材製造時のCO<sub>2</sub>排出量の割合が橋長32mの場合より橋長85mの場合に大きくなっている。

### 3.2 単位長さあたりのCO<sub>2</sub>排出量の比較

上記の結果から求めた橋梁の単位長さあたりのCO<sub>2</sub>排出量を表-11に示す。両者の橋梁ではほぼ等しい値となった。これはCO<sub>2</sub>排出量の相当部分が資材製造によるものであるためと考えられるが、構造形式やさらに橋長の異なる橋梁について検討を行い比較する必要がある。

表-9 セメントの廃棄物リサイクル量<sup>6)</sup>

セメント名	廃棄物リサイクル量
ポルトランドセメント	107.9wet
高炉セメントB種	61.5wet-kg/t

表-10 PC橋におけるCO<sub>2</sub>排出量の比較

	橋長32m		橋長85m	
	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )	構成比(%)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> )	構成比(%)
資材製造	114896	78.81	325453	86.32
運搬	11	7.65	28604	7.59
施工	19	13.54	229	6.09
合計	145795	100	3770	100

#### 4. エコセメント使用による環境負荷低減

エコセメント 1 t 製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量と廃棄物リサイクル量を表 - 12<sup>8)</sup> に示す。この工事においてポルトランドセメントを使用したときと、ポルトランドセメントをエコセメントで代用したときの CO<sub>2</sub> 排出量と廃棄物リサイクル量の比較結果を表 - 13 に示す。エコセメントの使用により、ポルトランドセメントを使用した場合に比べ廃棄物リサイクル量は 5.4 倍となる。

#### 5. 環境負荷の統合化

##### 5.1 DtT 法による統合化

###### (1) DtT 法

基準値または目標値に対する現状値の超過割合に比例した重み付けを行い、負荷指標を算出する手法を DtT (Distance-to-Target) 法という<sup>9)</sup>。使用するセメントが異なる場合の環境指標を DtT 法により求め比較を行った。

###### (2) 重み付け

温暖化の目標値は、1990 年の温室効果ガス排出量 (1224 百万 t) に対してマイナス 6% (京都議定書) であり、平成 11 年時の温室効果ガス排出量は 1307 百万 t であることから、重み付け係数を式 (1) により求めた。また、廃棄物 (産廃最終処分量) は、平成 22 年目標値が 3100 万 t であるのに対し、平成 10 年の産業最終処分量

は 5800 万 t であることから、重み付け係数を式 (2) により求めた<sup>10)</sup>。

$$1307 \text{ 百万 t} \div \{1224 \text{ 百万 t} \times (1 - 0.06)\} = 1.136 \quad (1)$$

$$5800 \text{ 万 t} \div 3100 \text{ 万 t} = 1.933 \quad (2)$$

###### (3) データの正規化

CO<sub>2</sub> 排出量、廃棄物量について、それぞれの国内総量に占める割合を計算し環境負荷を無次元化しデータの正規化を行った。国内総量として CO<sub>2</sub> 排出量は 1225 百万 t (平成 11 年)、廃棄物量は 408 万 t (平成 10 年、産業廃棄物発生量) を用いた。計算結果を表 - 14 に示す<sup>10)</sup>。

###### (4) 統合化

重み付け係数と正規化された値から式 (3) により、環境負荷指数を算出した。CO<sub>2</sub> 排出量は環境負荷なので正の値、廃棄物リサイクル量は環境負荷低減なので負の値として計算した。それぞれのケースで統合された環境負荷指数を表 - 15 に示す。

環境負荷指数

$$= \Sigma (\text{各正規化値} \times \text{重み付け係数}) \quad (3)$$

##### 5.2 エココストによる統合化

###### (1) エココスト

エココストとは、それぞれの環境負荷要因をコスト化することによって、環境負荷を総合的に評価するものである<sup>11)</sup>。CO<sub>2</sub> 排出などの環境

表 - 11 単位長さあたりの CO<sub>2</sub> 排出量

橋長(m)	単位長さあたりのCO <sub>2</sub> 排出量
32	4556kg-CO <sub>2</sub> /m
85	4435kg-CO <sub>2</sub> /m

表 - 12 エコセメントの原単位<sup>8)</sup>

	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	廃棄物リサイクル
エコセメント	800	614.7dry-kg/t

表 - 13 使用セメントの相違による比較

	ポルトランドセメント使用	エコセメント使用
CO <sub>2</sub> 排出量	186173kg-CO <sub>2</sub>	182703kg-CO <sub>2</sub>
廃棄物リサイクル量	10908kg	58801kg

表 - 14 正規化した環境負荷の値

	ポルトランドセメント使用	エコセメント使用
CO <sub>2</sub> 排出量	1.520 × 10 <sup>-7</sup>	1.491 × 10 <sup>-7</sup>
廃棄物リサイクル量	0.267 × 10 <sup>-7</sup>	1.441 × 10 <sup>-7</sup>

表 - 15 環境負荷指数

	ポルトランドセメント使用	エコセメント使用
環境負荷指数	1.210 × 10 <sup>-7</sup>	-1.092 × 10 <sup>-7</sup>

負荷を増大させるものは正のエココスト，リサイクルにより環境負荷を低減するものは負のエココストとする。

## (2) 環境負荷のエココスト

CO<sub>2</sub> 1 t あたりのエココストは諸外国における炭素税率の数値から 3000 円とし，廃棄物リサイクル 1 t あたりのエココストは管理型処分場にて最終処分される廃棄物のエココストを負の値にした -19000 円とした<sup>11)</sup>。ここで最終処分廃棄物の単位体積質量は 1 t/m<sup>3</sup> とした。

## (3) 統合化

セメントしてポルトランドセメントとエコセメントを使用したケースでのエココストの比較結果を表 - 16 に示す。

### 5.3 環境負荷の統合化について

DtT 法，エココストのいずれにおいても，複数の環境負荷要因を統合化する手法として利用可能であることが上記の結果で明らかになった。使用するセメントの相違による数値の相対的な大きさは両者で異なるものの，数値化する概念の上で両者に本質的な相違はなく，相対的な大きさの相違はエココストの設定によってもたらされているものと考えることができる。

さらに多くの構造物について，これらの手法を適用したケーススタディを実施することにより，統合化手法の確立を行う必要がある。

## 6. まとめ

本論文では PC 道路橋を例に取り上げ，環境

負荷要因である CO<sub>2</sub> 排出量と，廃棄物量について，ライフサイクルにおける環境負荷評価を行った。その結果，以下のことが明らかとなった。

- 1) ライフサイクルにおける環境負荷では資材製造に伴うものが圧倒的に大きく，施工に伴うものが次いで大きくなる。
- 2) 本研究の範囲では，PC 橋単位長さあたりの CO<sub>2</sub> 排出量は橋長によらず，ほぼ等しくなった。
- 3) コンクリートにおける環境負荷要因として DtT 法やエココストの利用が可能であることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 土木学会地球環境委員会環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会編：土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会講演要旨集，1997
- 2) (財) 建設物価調査会：建設省土木工事積算基準 (平成 12 年度版)，2000
- 3) (社) 日本建設機械化協会：建設機械等損料算定表 (平成 12 年度版)，2000
- 4) Portland Cement association (PCA) R&B serial No.2137 Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement Concrete
- 5) (財) 建設物価調査会：建設工事標準歩掛建設機械等損料算定表，1998
- 6) (社) セメント協会提供データ
- 7) 構造物の維持補修技術研究会：構造物の維持補修技術に関する研究報告書，Vol.4，pp.305-314，2001
- 8) 佐野奨他：都市ごみ焼却灰処理に伴う環境負荷の定量化，資源環境対策，pp.58-64，2000.8
- 9) 松野他：日本におけるインパクトアセスメント統合指標の開発，日本エネルギー学会
- 10) 環境省報道資料 <http://www.env.go.jp/press/press.php3?serial=2689>，2001.6
- 11) 土木学会：資源有効利用の現状と課題，pp.81-87，1999.10

表-16 エココストの計算結果

環境負荷	ポルトランドセメント使用		エコセメント使用	
	数量	エココスト (百円)	数量	エココスト (百円)
CO <sub>2</sub> 排出量	186173 kg-CO <sub>2</sub>	5585	182703 kg-CO <sub>2</sub>	5481
廃棄物リサイクル量	10908 kg	-2073	58801 kg	-11172
	合計	3512	合計	-5691