

# コンクリート構造物のライフサイクル環境負荷算定手法の開発



所属名：広島大学大学院  
工学研究科  
発表者：河合 研至

## 1. はじめに

土木構造物はその規模が大きいことから、建設にあたっては環境に及ぼす影響も大きくなる。環境問題が非常に重要視されつつも、コンクリート構造物の環境負荷に関しては、その定量的な検討は行われておらず、また評価方法も確立されていないのが現状である。一方、中国地方は国内の中でも良質な骨材の確保が困難な地域であり、再生骨材の積極的な利用が望まれている。また骨材に限らず、各県では各種廃棄物の建設材料としての活用を推進させる方向にあり、これらの材料の利用が環境負荷低減に資する行為となることを十分な根拠を持って説明責任を果たすためには、環境負荷の定量的な把握が不可欠となってくる。しかも、環境負荷に関しては、初期建設時のみ低減されればよいものではなく、コストと同様、ライフサイクルで検討を行い、最小化を図る必要がある。以上の点を鑑み、コンクリート構造物においてライフサイクル環境負荷が容易に検討できる仕組みを整備すべく、各種の構造物においてライフサイクル環境負荷の算定・評価を行うことを可能とするシステムを構築することが本研究の最終目的である。

筆者はこれまでに、コンクリート構造物の環境負荷評価を行うに当たって必要となるインベントリデータの調査から、コンクリート構造物のライフサイクル、輸送、各種エネルギーに関するインベントリデータを整備し、提示してきている<sup>1)</sup>。これらのインベントリデータを用いることによって、一般的なコンクリート構造物について、ライフサイクルでの環境負荷量のある程度算出できる段階にある。

ただし、実構造物あるいは新設構造物において環境負荷の評価を行う場合、単に現状での環境負荷量を算出するに留まらず、現状の環境負荷量を踏まえた上で、さらなる環境負荷低減を図る方策を検討することが、環境負荷評価としては重要な位置付けにある。本研究の最終目的としての、ライフサイクル環境負荷評価のシステム構築とは、このような環境負荷低減に資する取組みを容易とすることを目指すものである。環境負荷低減を図る上で、最も変更が容易な要素として材料等の輸送手段があり、産業副産物を活用するなかでは、輸送に伴う環境負荷量の影響が非常に重要なウェイトを占めてくる。

以上を踏まえ、ここでは特に、混和材の有効活用を図る上での輸送に伴う環境負荷の影響を、材料としてフライアッシュ（石炭灰）を取り上げて検討した。またさらに、2つの構造物を事例として環境負荷の算出を試み、ライフサイクル環境負荷の算出・評価を行うシステム構築における問題点の抽出を行った。

## 2. 材料の輸送に伴う環境負荷の検討

### 2. 1 中国地方に関する検討

中国地方の各石炭火力発電所から、利用用途（セメント原料の粘土代替用、土工材用、JIS 灰用、土地造成材用、民間埋立）ごとに石炭灰の輸送先を追跡調査し、これによって、石炭灰の輸送経路を明らかとし、輸送に伴う環境負荷を算出する際の基礎データとした。環境負荷評価を行うインベントリは、CO<sub>2</sub> 排出量、NO<sub>x</sub> 排出量、SO<sub>x</sub> 排出量、ばいじん排出量を対象とし、輸送に関するこれらのインベントリには、筆者らの既往の研究成果<sup>1)</sup>を用いた。

石炭灰が粘土代替あるいは JIS 灰として利用されたときの、輸送に伴う環境負荷量の計算結果を表-1 に示す。ただし、ここで、取引先であるセメント工場までの輸送方法、取引先からサービスステーション

までの輸送方法は調査結果から明らかとしているが、サービスステーションから生コン工場までの輸送手段は10tトラックで、輸送距離40kmと仮定した。この結果において、粘土代替利用における発電所からセメント工場、セメント工場からサービスステーションへの輸送は主に船舶で行われているのに対して、JIS灰利用における発電所からセメント工場への輸送は10tトラックで行われている。輸送手段の原単位を比較する限りでは、粘土代替利用の方が環境負荷は小さいが、船舶利用の方が輸送距離が長くなるため、単位輸送量あたりの環境負荷量としては粘土代替利用の方が大きくなる。概念的には、船舶輸送の方が車両輸送と比較して環境負荷は小さいと考えられるが、実際の環境負荷量には輸送距離が大きく関係するため、船舶輸送と車両輸送の選択では、輸送量と輸送距離の両者を勘案する必要があることを示す結果となった。

次に、石炭灰が混和材（フライアッシュ）としてさらに活用されたときを想定して、その輸送に伴う環境負荷量の算出を試みた。ここではフライアッシュの利用を推進したい目標値を、現状の各県生コン出荷量の20%をフライアッシュコンクリートとすることとし、フライアッシュの使用量を80kg/m<sup>3</sup>とした。また、混和材の供給先は各県庁所在地とし、発電所からは中継サイロを経て生コン工場へ輸送されるものとした。発電所から中継サイロまでの輸送は1000t級船舶、中継サイロから生コン工場までの輸送は10tトラックによるものとしている。一方、山口県に関しては、中継サイロを経由するよりも、発電所から直接生コン工場へ輸送した方が効率的であるため、中継サイロの経由は考慮していない。以上の仮定の下で計算を行った結果を表-2に示す。この結果から、単位輸送量あたりの環境負荷量が、供給エリアによって大きく異なることがわかる。すなわち、産業副産物の有効利用を図るうえで、輸送に伴う環境負荷量に着目したとき、産業副産物の有効利用には地域性が存在する可能性がある。

表-3は、筆者らの既往の研究成果として得られている、混和材利用した場合のフライアッシュの原単位を示している。フライアッシュは産業副産物であるため、発電所において発生する環境負荷は全て電力

表-1 中国地方で排出された石炭灰のうち、国内セメント会社を輸送先とする輸送に伴う環境負荷

用途	粘土代替	JIS灰	合計	
輸送先	国内セメント会社	国内セメント会社		
輸送量(t)	293,440	12,994	306,434	
単位輸送量あたりの環境負荷量	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /t)	47.058	37.854	46.667
	SO <sub>x</sub> 排出量(kg-SO <sub>x</sub> /t)	0.714	0.486	0.705
	NO <sub>x</sub> 排出量(kg-NO <sub>x</sub> /t)	1.232	0.879	1.217
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.022	0.019	0.021

表-2 中国地方で排出される石炭灰のうち、混和材利用目標量を各県県庁所在地へ供給したと仮定した場合の、輸送に伴う環境負荷

供給エリア	岡山県	広島県	山口県	島根県	鳥取県	合計	
輸送量(t)	25,788	36,538	23,620	14,991	10,782	111,718	
単位輸送量あたりの環境負荷量	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /t)	39.645	29.356	4.880	14.870	29.855	24.661
	SO <sub>x</sub> 排出量(kg-SO <sub>x</sub> /t)	0.602	0.425	0.004	0.176	0.434	0.344
	NO <sub>x</sub> 排出量(kg-NO <sub>x</sub> /t)	1.042	0.745	0.037	0.326	0.759	0.609
	ばいじん排出量(kg-PM/t)	0.019	0.014	0.003	0.008	0.014	0.012

表-3 混和材利用したときのフライアッシュの原単位<sup>1)</sup>

単位(*)	エネルギー投入量(GJ)	購入電力(kWh)	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /*)	SO <sub>x</sub> 排出量(kg-SO <sub>x</sub> /*)	NO <sub>x</sub> 排出量(kg-NO <sub>x</sub> /*)	ばいじん排出量(kg-PM/*)
t	0.43	48.2	17.9	6.20×10 <sup>-3</sup>	7.54×10 <sup>-3</sup>	1.25×10 <sup>-3</sup>

※斜字体は電力起源のみを考慮（プロセス起源は不明）

表-4 トラック (10t), 船舶 (1,000t 級) のインベントリデータと石炭灰を粘土代替利用, JIS 灰利用した場合の輸送に伴う単位輸送量あたり環境負荷 (全国平均) の比較

	インベントリデータ		単位輸送量あたりの環境負荷	
	トラック (10t)	船舶 (1,000t 級)	粘土代替利用時	JIS 灰利用時
CO <sub>2</sub> 排出量	0.122 kg-CO <sub>2</sub> /(km・t)	0.0999 kg-CO <sub>2</sub> /(km・t)	64.104 kg-CO <sub>2</sub> /t	61.699 kg-CO <sub>2</sub> /t
SO <sub>x</sub> 排出量	0.0000941 kg-SO <sub>x</sub> /(km・t)	0.00172 kg-SO <sub>x</sub> /(km・t)	1.003 kg-SO <sub>x</sub> /t	0.878 kg-SO <sub>x</sub> /t
NO <sub>x</sub> 排出量	0.000914 kg-NO <sub>x</sub> /(km・t)	0.00289 kg-NO <sub>x</sub> /(km・t)	1.722 kg-NO <sub>x</sub> /t	1.545 kg-NO <sub>x</sub> /t
ばいじん排出量	0.0000768 kg-PM/(km・t)	0.0000444 kg-PM/(km・t)	0.030 kg-PM/t	0.029 kg-PM/t

表-5 石炭灰を粘土代替利用, JIS 灰利用した場合の輸送に伴う単位輸送量あたりの環境負荷 (全国平均) と等しくなるトラック (10t), 船舶 (1,000t 級) の輸送距離

	粘土代替利用時		JIS 灰利用時	
	トラック (10t)	船舶 (1,000t 級)	トラック (10t)	船舶 (1,000t 級)
CO <sub>2</sub> 排出量	525.4 km	641.7 km	505.7 km	617.6 km
SO <sub>x</sub> 排出量	10,658.9 km	583.1 km	9,330.5 km	510.5 km
NO <sub>x</sub> 排出量	1,884.0 km	595.8 km	1,690.4 km	534.6 km
ばいじん排出量	390.6 km	675.7 km	377.6 km	653.2 km

に転嫁しており, ここでの環境負荷は分級処理などフライアッシュを製造するが故に発生する環境負荷のみを考慮している. この値と, 表-1, 表-2 に示す単位輸送量あたりの環境負荷量を比較したとき, 輸送に伴う環境負荷の寄与が非常に大きいことがわかる. 石炭灰が粘土代替あるいは混和材としてコンクリートの用途へ利用されるとき, これに関わる環境負荷としては, 材料製造時と輸送に伴う環境負荷のみであり, 環境負荷の観点からフライアッシュの有効利用を検討するうえでは, 輸送手段の最適化が非常に重要となることが, この比較から明らかである.

## 2. 2 全国を対象とした検討

中国地方に関する検討結果を踏まえ, (1) と同様の方法により, 範囲を全国に広めて調査を実施し, 環境負荷量の試算を行った. 環境負荷量算出でのインベントリデータには, 参考文献1)の値を使用した.

粘土代替利用, JIS 灰利用を行った場合の輸送に伴う単位輸送量あたりの環境負荷量を, 10t トラック, 1,000t 級船舶のインベントリデータと比較し, 表-4 に示す. ここで, トラック, 船舶のインベントリデータに輸送距離をかければ, それぞれの輸送手段における単位輸送量あたりの環境負荷量となる. そこで, 粘土代替利用, JIS 灰利用を行った場合の輸送に伴う単位輸送量あたりの環境負荷量と等しくなる, 単位輸送量あたりの環境負荷量を与えるトラック, 船舶の輸送距離を求めてみた. これを表-5 に示す. フライアッシュを混和材として利用するとき, 輸送に伴う環境負荷がトラック輸送あるいは船舶輸送に伴う環境負荷のみであるとすれば, 輸送範囲を 300km 以内に限定すれば, CO<sub>2</sub> 排出量, SO<sub>x</sub> 排出量, NO<sub>x</sub> 排出量, ばいじん排出量のいずれの環境負荷量も, 粘土代替利用や JIS 灰利用を行うよりも環境負荷の観点からは負荷低減につながることを示している.

## 3. 環境負荷量算出の事例

### 3. 1 スノーシェルター下部工

スノーシェルター (区間長: 100m) の下部工を対象として, 2つの工法について環境負荷量の試算を行った. 1つは一般的な工法であり, 場所打ちコンクリートにより施工を実施する工法である (以下, Case-1). もう1つはマイクロパイルとプレキャストコンクリートを組み合わせる工法で, 現場施工の合理化と省人化, 工期短縮を図る新技術である (以下, Case-2).

各段階における環境負荷の算出結果を表-6 に示す. 表より, Case-1 と比較して, Case-2 ではエネルギー投入量で 52%, CO<sub>2</sub> 排出量で 60%程度といった大幅な環境負荷低減を図ることができる結果となった.

表一六 各工法における環境負荷量の試算結果（スノーシェルター）

	エネルギー投入量 (GJ)			CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )			
	Case-1	Case-2	比率 <sup>(*)</sup>	Case-1	Case-2	比率 <sup>(*)</sup>	
材料製造	3,265	2,214	0.68	582,191	260,846	0.45	
資材運搬	493	390	0.79	34,035	26,879	0.79	
施工（建設機械）	974	34	0.33	147,638	48,644	0.33	
廃棄物	運搬	130	4	0.03	67,100	2,318	0.03
	処理	2042	673	0.03	8,998	300	0.03
合計	6,904	3,315	0.48	839,962	338,987	0.40	

(\*) 比率は、Case-1 に対する Case-2 の比率

また、段階別で Case-1 と Case-2 を比較したとき、材料製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量が Case-2 は Case-1 の 45%、施工に伴う CO<sub>2</sub> 排出量が Case-2 は Case-1 の 33% となっており、マイクロパイル基礎とプレキャスト製品を組み合わせることによって下部工の小規模化を図った Case-2 において、部材断面の縮小による使用材料の削減が大きな環境負荷低減効果をもたらしている。

以上の試算結果より、新技術の有効性等を環境負荷の観点から評価することが可能であり、本研究において用いている環境負荷評価の手法により、その評価を定量的に実施できることが明らかとなった。

### 3. 2 もたれ式擁壁工

もたれ式擁壁（高さ 8.0m、勾配 1:0.5、延長 120m）の試算でも、2つの工法を比較検討している。1つは一般的な工法であり、現場打ちコンクリートにより施工を実施する工法である（以下、Case-1）。もう1つは大型中空ブロックを用いた工法で、内部が空洞となった大型ブロックを階段状に積み、建設発生土を中詰め材として有効利用することで擁壁質量を確保しつつ、コンクリートの使用量、建設発生土の処分量を低減するとともに、工期短縮を図る新技術である（以下、Case-2）。

それぞれの工法における環境負荷量の試算結果を表一七に示す。Case-2 では、天然資源使用量、廃棄物発生量、大気排出物質量のいずれにおいても、Case-1 を大幅に下回る結果となった。

環境負荷を評価するとき、以上のように各種の環境負荷量を考えると、それぞれに対してどれだけの環境負荷低減がなされるかは評価できるが、全体としての影響が相対比較しにくい。例えば、CO<sub>2</sub> 排出量は削減されるが SO<sub>x</sub> 排出量は上昇してしまったような場合に、それは環境負荷低減に貢献していると判断するのか否かといったことである。

このような複数の環境負荷要因を総合化して評価を行う手法として、環境負荷の統合化がある。本研究

表一七 環境負荷量の試算結果（もたれ式擁壁）

	エネルギー投入量 (GJ)	天然資源使用量 (kg)					廃棄物発生量 (m <sup>3</sup> )
		石油換算	石炭換算	天然ガス	非金属鉱物	鉄	
Case-1	2,428	34,144	21,294	1,594	3,912,009	0	932
Case-2	1,736	24,972	13,022	943	2,157,676	1,557	343
比率 <sup>(*)</sup>	0.71	0.73	0.61	0.59	0.55	—	0.37
	大気排出物質量 (kg)						
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>		ばいじん		
			点源	線源	点源	線源	
Case-1	256,429	105	878	303	44	19	
Case-2	171,218	73	478	193	35	15	
比率 <sup>(*)</sup>	0.67	0.70	0.54	0.64	0.79	0.79	

(\*) 比率は、Case-1 に対する Case-2 の比率

表一 8 LIME による環境負荷統合化の結果

	被害量				統合化結果		
	人間健康 (DALY)	生物多様性 (EINES)	一次生産 (kg)	社会資産 (円)	Ver.1 (円)	Ver.2 (無次元)	Ver.3 (無次元)
Case-1	$7.97 \times 10^{-2}$	$5.79 \times 10^{-7}$	$2.50 \times 10^5$	$4.06 \times 10^5$	$9.01 \times 10^6$	$5.24 \times 10^6$	$5.34 \times 10^6$
Case-2	$5.55 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-7}$	$1.66 \times 10^5$	$2.73 \times 10^5$	$6.54 \times 10^6$	$3.80 \times 10^6$	$3.83 \times 10^6$
比率(*)	0.70	0.86	0.66	0.67	0.73	0.73	0.72

(\*) 比率は、Case-1 に対する Case-2 の比率

においても、LIME（日本版被害算定型環境影響評価手法）を用いてこの統合化を試みた。統合化の試算結果を表一 8 に示す。値で比較すると、Case-1 に対する Case-2 の比率が、人間健康の被害指標、生物多様性の被害指標、一次生産の被害指標、社会資産の被害指標でそれぞれ 30%、14%、34%、33%と、各被害量で異なり、それぞれに対する影響の度合いが異なることがわかる。一方、単一指標化した場合の比率はいずれの Ver.でも 27~28%となっている。以上のことから、複数の環境負荷要因を統合化して評価することは可能であるが、それぞれの被害指標に及ぼす影響は異なり、環境負荷のなかでも如何なる点に重点を置いて削減を図るかによって、環境負荷低減策が異なることが示された。

環境負荷の統合化は、上記の LIME によって可能ではあるが、現状の LIME によってすべての環境影響を統合化して評価できるものではない。例えば、ここで Case-2 として取り上げたもたれ式擁壁では、施工後に大型ブロックの上面を緑化している。計算の上では、土地利用の改変としてその一部が考慮されているが、緑化そのものによる CO<sub>2</sub> 吸収などが考慮されておらず、また、緑化を施すか施さないかによる景観面での相違についても考慮されていない。

一般的に、環境負荷をライフサイクルで評価する考え方は、ISO 14040 に記されているように製品・サービスに対しては容易に適用が可能である。しかし、土木構造物は供用年数が極めて長いために、ライフサイクルで環境負荷を評価しようとした場合、供用開始時以降の評価が難しい。技術の進歩によって、維持管理手法や解体手法が大きく変わる可能性が十分にあるからである。また、永久構造物としての役割を果たす可能性のある構造物も少なくない。これらのことから、土木構造物特有の性質を踏まえたライフサイクル環境負荷評価を行う必要があると考えられる。この事例における大型ブロック上面の緑化に関して、供用年数が長くなればなるほど、その効果が発揮されてくるものと思われる。これを如何に評価するかは、今後十分に検討を行わなければならない。

#### 4. まとめ

本研究では、以下のことが明らかとなった。

- (1) 産業副産物では、輸送に伴う環境負荷の影響が全体に大きく反映される。なかでも輸送距離の影響が大きく、これを最小化するよう輸送手段や輸送経路の選択を行うことが望ましい。
- (2) 現状のインベントリデータを用いて、コンクリート構造物の環境負荷を定量的に評価可能であり、環境負荷の観点から材料や工法の選択を行う場合には、比較検討用の有効な数値として利用できる。
- (3) 複数の環境負荷要素を統合化した環境負荷評価が可能である。ただし、現状では統合化が可能な要素は限定され、緑化など景観面を配慮した要素のさらなる追加、検討が必要である。
- (4) 土木構造物はライフサイクルが非常に長いため、その特性を考慮したライフサイクル環境負荷の評価方法を構築する必要がある。

#### 《参考文献》

- 1) 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），土木学会，2004
- 2) 全国生コンクリート工業組合連合会・全国生コンクリート協同組合連合会：年度別・都道府県別出荷実績（平成 17 年度）