

2. 環境負荷評価(LCA) 研究小委員会の調査研究と橋梁への適用

THE WORK REPORT OF LCA SUBCOMMITTEE IN THE JSCE. —APPLICATION OF LIFE-CYCLE ASSESMENT FOR BRIDGE-DESIGN—

土木学会地球環境委員会

環境負荷評価(LCA) 研究小委員会 金 聲 漢

Seong Han KIM

ABSTRACT; This paper is the work report of LCA subcommittee in Japan Society of Civil Engineers. The object is to brief on the calculating as a test of LCA for civil engineering structure (roads, dams, tunnels, bridges, clean water and sewage systems), and to estimate application possibility of LCA as a design tool from application instance to practical design to bridge.

KEYWORDS; life-cycle assessment(LCA), civil engineering structure, carbon dioxide emission, impact assessment, bridge-design

1. はじめに

土木学会地球環境委員会環境負荷評価(LCA) 研究小委員会は、ISO/TC207 の LCA 部会での検討作業を踏まえ、土木構造物が地球環境に与える負荷の長期的影響の評価やその代替手法による負荷原稿かを定量的に評価できるような手法を検討することを目的として、平成6年度より3カ年に渡り、下記項目について調査研究を進めてきた。

- ①資材別・工法別の環境負荷(廃棄物、CO₂ 排出など) 原単位の検討
- ②構造物の耐用年数、リサイクル率を考慮した環境負荷算定方法の検討
- ③具体的土木構造物の寿命期間にわたる環境負荷の推定

調査初年度は、主として環境負荷の評価手法の調査分析と土木建設業への適用性について予備的な検討を行った。その結果、地球温暖化の主原因物質である二酸化炭素の排出量についてはかなりのデータが集まりつつあり、LCA 的分析は可能であるが、その他の環境負荷物質についてはいまだ基礎データが十分でなく、定量的評価は困難であるという状況が把握され、次年度以降に LCA を行うべき土木構造物の候補が絞り込まれた。

第2年度においては、暫定的な環境負荷原単位の設定と、初年度に選定された代表的土木構造物(道路舗装・ダム・山岳トンネル・橋梁・下水道終末処理施設) に対する二酸化炭素の排出量に着目した LCA の試算を行い、昨年度の地球環境シンポジウムにおいて盛岡¹⁾、酒井²⁾、小泉ら³⁾により、その成果が報告されている。

さらに最終年度である第3年度は、将来的な LCA 試算手法の標準化を目標として、昨第2年度の試算結果の見直し、環境負荷軽減のための代替手法に関する追加検討、試算手法の簡易化、新たな試算例の追加 等多岐にわたる検討を行い、当初掲げた3つの目的について一応の成果を得ることができたものと考えられる。

そこで、本報告は上述の委員会の報告書^{4)~6)}より、第3年度の検討成果の概要を示した後、筆者が担当した橋梁設計事例への LCA の適用例を用いて、試算の概要と実務設計への適用に関して考察を示すものである。

*日本技術開発土木本部総合技術部 Civil Eng. Dept. JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS CO. LTD.、平成6年度に地球環境委員会に土木建設業環境管理システム小委員会 LCA 検討部会(部会主査 盛岡 通)として発足し、平成8年度より小委員会としての活動に発展・メンバーは盛岡 通 小委員長以下、阿部 徹、井村 秀文、乙間 末広、金 聲 漢、小室 信幸、酒井 寛二、下畑 隆司、船水 正雄、高柳 則男、鶴巻 峰夫、内藤 弘、中牟田 直昭、花木 啓祐、藤岡 荘介、前川 昭禮、松岡 譲、南 哲久、森下 研、増永 元彦、和久 昭正の21名。

2. 平成8年度の検討成果の報告（代表的な土木構造物に対する LCA の試算例）

(1) 共通的な基礎データ

平成7年度においてはCO2を対象とした土木建設業のためのLCA用統一的原単位をとりまとめたが、これに代わるものとして、廃棄物を対象としてデータの収集をはかり、原単位の提案を試みた。

その結果、ある程度のデータは収集されたものの、これら文献はLCAの視点からの研究事例が少ない、すなわち、廃棄物の処理の考え方のみを示したものが多く、原単位を推定するのに必要な具体的な数値が示されている例が少ないことから、CO2と同レベルの値を提案するには至らなかった。

(2) 道路舗装

アスファルト舗装およびコンクリート舗装の修繕サイクル（40年を想定）を対象として、両舗装の炭素排出量の差を試算するとともに、これらにリサイクル材を適用した場合の環境負荷低減（炭素）効果とともに、廃棄物の低減について定量的把握を試みた。

試算結果の一例を表-2.1に示す。試算の条件下ではアスファルト舗装がコンクリート舗装に比べて炭素排出量が少なく、かつリサイクル材の使用によりさらに環境負荷低減の可能性を秘めていることが明らかとなった。

表-2.1 炭素排出量の試算例（単位：kg-C/m²）

舗装種別	コンクリート		アスファルト			
使用材料	バージン材	再生骨材	バージン材	再生アスファルト	バージン材 リペア工法	再生アスファルト リペア工法
炭素排出量	29.49	28.76	28.47	25.93	22.73	22.63

※ただし、上記は修繕サイクル40年間の対象として以下を含む。コンクリート舗装：建設・オーバーレイ1回・解体～廃棄（1サイクル）・アスファルト舗装：建設2回・オーバーレイ2回・解体～廃棄2回（2サイクル）

さらに、この試算例を用いて、日本の総道路延長約113万kmの舗装道路の維持修繕に、リサイクル材を適用した場合の炭素排出低減量は修繕サイクルで割り戻すと年当たり366C-ktにもおよぶものと推定している。

(3) ダム

ダムに関するLCAの試算は昨年度のシンポジウム報告³⁾にもあったように膨大な工種を対象として逐一作業重機のサイクルタイムを計算していくことが必要であり、LCAの試算のために膨大な作業量を必要とする。そこで、ダム工事の中で多くの比率を示す掘削工・盛り立て工を対象として、作業のサイクルタイムに戻ることなく炭素排出量を概算可能な下記に示す簡便式の提案を試みた。

$C = C_s + C_t$ ここに、C:ある工種の炭素総排出量

Cs:集土、積み込み、敷き均し等拠点における土工作业による排出量

Ct:ダンプトラックによる土砂運搬に伴う排出量

具体的には、LCAの試算を行った13の工種別の総排出炭素量に対して、工種毎の土工量と、ダンプトラックの運搬距離との関係を最小二乗法に当てはめ、上式中の各係数を提案した。

(4) シールドトンネル

都市内のセグメント外径シ7.1mのールドトンネルを対象としてLCAの試算を行った。試算は、シールドトンネル本体(1,000m)のみを対象とし、掘進工法として「土圧工法」と「泥水工法」の2種類を想定して工法による差についても比較を試みた。

試算結果を表-2.2に示す。表には参考として昨年度実施の山岳トンネル工法の試算例⁵⁾（延長430m、幅12mと条件はすべて異なる）を示している。これより、以下が結論されている。

①建設段階の全炭素排出量に占める各段階の比率

資材の製造が全体の8割を占め、ついで運搬、施工の順となっている。山岳トンネルの場合には、運搬、施工の比率が逆転しているが、資材消費が大半を占める傾向は変わらない。

②シールドマシンについて

シールドマシンは全炭素排出量の2割もの炭素排出量を占め、その消却方法が大きく結果に影響することとなる。したがって、施工条件やマシンの再利用の条件によって少しでもマシンの消却を有効に行うことで、負荷を低減可能である。

③工法の差について

本試算例では泥水工法の方が炭素排出量は少ない結果となっているが、この差はある限られた条件下でのものであり、泥水工法が不利な地盤条件下では施工ロスが大きくなるために、土圧工法の炭素排出量が少なくなることも十分に考えられる。したがって、施工条件に対して如何に適切な工法を採用するかが重要である。

表-2.2 シールドトンネルに対する試算例（建設段階のみ、単位：t-C）

	資材製造		運 搬		施 工		合 計
	排出量	比率	排出量	比率	排出量	比率	排出量
土圧工法	1,467.7	79.1	265.9	14.3	122.5	6.6	1,856.1
泥水工法	1,455.4	79.2	266.2	14.5	115.7	6.3	1,837.3
山岳トンネル	1,607.2	86.4	39.6	2.1	212.7	11.5	1,859.5

(5) 浄水施設

1日の浄水処理量が約20万ton規模の既存の浄水設備を改築を対象として、高処理対応の浄水システムの構築に伴う炭素排出量の現行施設からの変化に着目してLCAの試算を行った。

その結果、表-2.3に示す結果が得られ、これより以下が結論された。

①高度処理による負荷の変化

浄水場での高度処理による施設の更新は、今回の条件下において従来の方法に比べて、約30%の炭素排出量の増大をもたらす。

②負荷の削減について

試算における炭素排出量の80%がプラント用の電力消費に起因したものとなっており、高度化処理によるプラント用電力の増加が炭素排出量の増大につながった結果となっている。今後如何にこの電力消費を低減するかが非常に重要である。また、送水施設のポンプによる電力消費も全体の1/3を占めており、この削減も大きな課題である。

表-2.3 浄水施設に対する試算例（処理量1,533,000m3/日当たり）

方 式	高度処理	既 存
概 要	生物・オゾン・活性炭処理	凝集沈殿＋急速濾過
炭素排出量(t-C)	250,662	186,597
単位処理当たり負荷量(kg-C/m3)	0.164	0.122

3. 橋梁設計への適用例

(1) 検討目的

橋梁の建設に際して、環境負荷を少しでも減らすためには、橋梁形式選定の際に環境負荷の少ない形式を選定しておくことが重要であり、かつ最も根本的な対策といえる。

その一方で、橋梁形式の選定は橋梁建設に係わる設計の初期段階に実施され、かつその時点では主材料の数量程度しか算出しないために、現在各方面で検討されている詳細な積み上げによる炭素排出量の算出、およびそれに基づく排出量の絶対値の把握は困難な状況にある。しかしながら、形式比較という意志決定に際しての要因の一つと考えれば、これにLCAを適用することは十分可能であると考えられる。

そこで、ひとつのケーススタディとしてある計画条件下での橋梁比較設計を対象とし、施工・運搬までを含んだLCAを実施し、その結果から橋梁比較設計におけるLCAの適用について考察したものである。

(2) 検討対象

検討対象は良好な砂礫地盤上に建設される橋長81mの高架橋であり、その一部がJRを跨ぐ跨線橋となっ

ている。このような計画条件の下で比較すべく抽出された3案を図-3.1に示す。それぞれの案の概要は下記のとおりである。

第1案；鋼3径間連続非合成板桁橋(L=3@27m=81m)

ごく一般的な案であり、スパンを長くすることで下部工の基数を減らして、トータルコストの軽減を図る案であり、相対的に地盤条件が悪い場合に有利となる。工場製作された桁は、現場まで分割されて運搬され、現場にて地組された後、トラッククレーンにて既に構築された下部工上に架設される。下部工は全4基。

第2案；PC4径間連結プレテンT桁橋(L=2@20m+2@20.5m=81m)

基礎地盤が比較的良好な場合に用いる一般的な案。スパン長20.5mは工場製作されるPC桁の運搬可能なほぼ最大長に相当する。工場製作されたPC桁はそのままの形で現場まで運搬され、1案同様トラッククレーンにより架設される。下部工は全5基。

第3案；RC4径間連続中空床版橋+PC単純プレテンT桁橋(L=4@15m+21m=81m)

RC中空床版橋は、2案と同じく基礎地盤が比較的良好な場合に用いられる案であり、場所打ちコンクリートを現場で打設して上部工を構築する案。ただし、JR跨線部は場所打ち床版の施工が不可能なため、2案同様、プレキャストのPC桁を架設するプレテンT桁を採用。下部工は全6基。

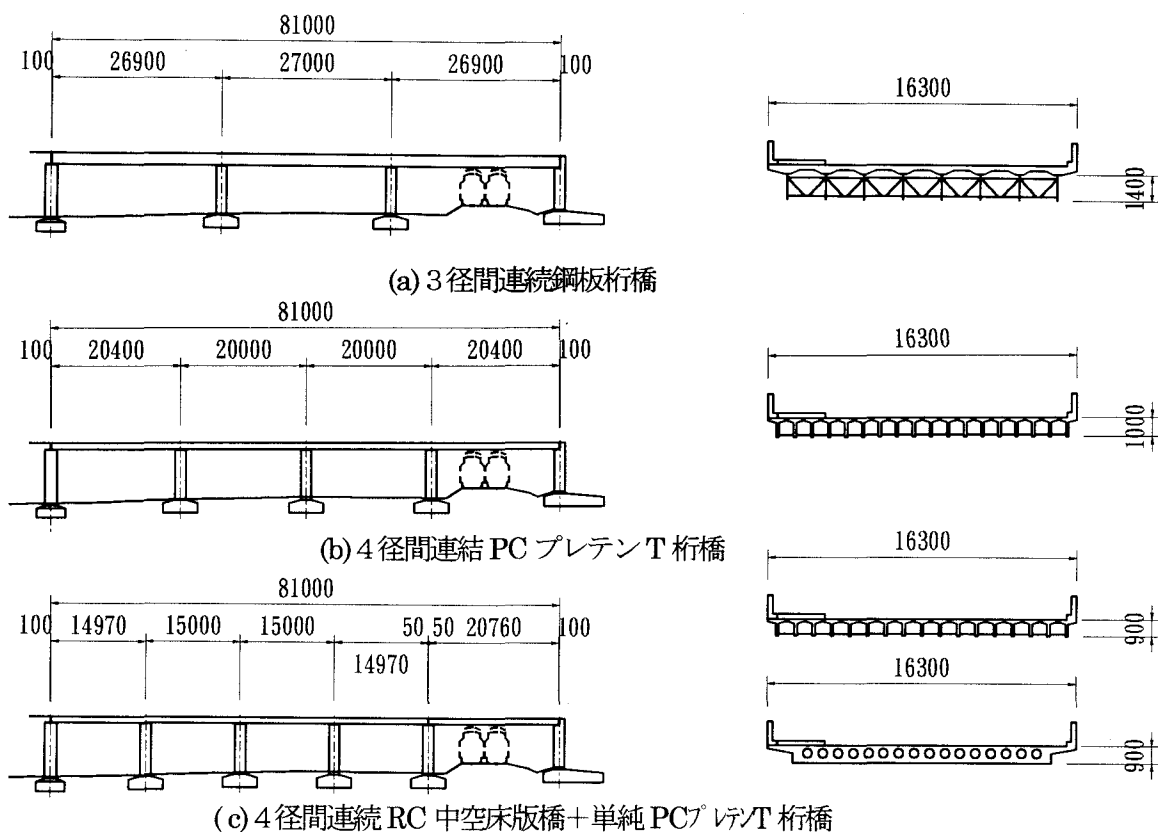


図-3.1 検討対象

(3) 検討条件

1) 想定するライフタイムサイクル

試算は下記フェイズのみに着目し、廃棄（撤去）は検討対象外とした。

①初期建設時：資材の生産、運搬、施工を算出対象とした。

②供用時：50年を想定し、その間の鋼橋の塗装の塗替え（2回を想定）のみを対象とした。

2) 炭素排出量算出のための資材等数量

試算のベースとなる主要資材の数量は、表-3.1に示す項目に対して算出された概算数量（比較設計レベルの設計段階で算出するラフなもの）とし、これに基づき運搬・施工数量を算出した。

表-3.1 数量算出項目

		鋼板桁橋	PC プレテン T 桁橋	RC 中空床版橋
上部工	主桁	鋼重・塗装	コンクリート・鉄筋・型枠・PC 鋼線	コンクリート・鉄筋・型枠 足場・支保工
	橋面工	コンクリート・舗装		
下部工	本土工	コンクリート・鉄筋・型枠足場・支保工		
	仮設工	土留め工・掘削・埋戻し		

3)炭素原単位および工費算出用単価

炭素の原単位は文献 2)に示す値を、また、工費は各資材に対して、施工賃込みの単価を建設物価⁸⁾等を参照して算出した。

4)炭素算出に係わる諸条件

a.資材

- ①本土工；数量に対して原単位を考慮。なお、鋼橋において主資材（桁類）は高炉製品として排出量を計上した。
- ②仮設材；リース材のように転用が行われる場合については、10 年間の転用を想定して、これに施工工期を反映しての炭素排出量を計上した。

b.運搬

運搬時の燃料消費による炭素排出量算定に用いる運搬距離としては往復距離として以下を想定した。

①鋼材および PC 桁

- ・鋼桁；製鉄工場から加工工場までの運搬として 100km を、橋梁工場から現場まで 400km を想定。
- ・鉄筋；製品工場から現場までとして 400km を想定。
- ・PC 桁；製作工場から現場までの運搬として、400km を想定。

②コンクリート；施工現場近傍のプラントからの運搬を想定した 50km。

③舗装材料；工場からの運搬を想定した 100km。

④塗装材料；工場からの運搬を想定した 200km。

⑤仮設リース材；主要都市からの運搬を想定した 400km。

⑥建設重機；近隣県からの運搬を想定した 100km。

⑦土捨て；土捨て場までの運搬を想定した 75km。

炭素排出量の算定に際しては、上記運搬距離に対して、時間当たり走行距離を 30km と想定して運搬車両の稼働時間を算定し、これを基本として軽油等「油脂の消費分」と「車両の損耗分」の両者に対して下式により炭素排出量を算出した。

燃料消費による炭素排出量 $Co = \text{燃料消費率} \times \text{稼働時間} \times \text{軽油の原単位}$

機械の消却による炭素排出量 $Cm = \text{車両重量} \times \text{損耗（料）率} \times \text{稼働時間} \times \text{機械重機の原単位}$

ここに、料消費率、損耗（料）率：建設機械等損料算定表⁷⁾による

c.施工（各種施工に係わる機械の種類および機械稼働時間）

建設省土木工事積算基準⁸⁾に基づき、施工機械および運転時間を算出し、これに対して②運搬同様、「油脂の消費分」と「車両の損耗分」の両者に対して炭素排出量を算出した。

(4)炭素排出量算出結果

炭素排出量算出結果の一覧を表-3.2 に示す。同表には炭素排出量の他、主要数量に基づく概算工費も併せて示している。

炭素総排出量に着目すると 1 案および 2 案がほぼ同程度の値を示し、これらに対して 3 案がやや大きめの値となっている。一方、概算工費に着目すると 2 案および 3 案がほぼ同様な値を示しているのに対して、1 案

がこれらを1割程度上回る結果となっている。これまでどおりの比較設計であれば、経済性に大差のない2案もしくは3案のいずれかを最適案として提案すべきかについて、橋梁設計者は相当に頭を悩ませ、工費以外の他の各種要因に差が無いかどうかをさらにこと細かく吟味の上、苦し紛れのストーリーを作り上げるようになったであろう。しかしながら、炭素排出量という新たな要因を用いれば、もちろん他の要因に決定的な差が無いことを条件として、2案が最適案として選ばれることになるのであろう。

炭素総排出量に占める各フェイズの割合に着目すると、資材消費が全体の7～8割程度と大きなウェイトを占め、施工そのものの炭素排出量は全体の1割に過ぎないことがわかり、これより基本的には資材消費のみを確実に押さえておくことで炭素排出量の相対関係に大きな間違いはないことが類推される。

また、表-3.2を詳細にみれば、上部構造の比較といいながら、結果的には下部構造を建設するに際して排出される炭素の方が多く、かつ各案ごとの差も大きいことは注目されるべきことであり、単純に言えば下部工基数が多い場合には相対的に不利となる可能性が高いと考えられよう。

表-3.2 炭素排出量算出結果

		CO2 排出量 (t. c)				直接工費 (百万円)	円当たり CO2 量*1
		資材消費	運搬	施工	合計		
1 案 鋼桁橋	上部工	143.0	12.3	22.6	177.9	233.8	0.76E-6
	下部工	132.2	25.7	23.5	181.4	129.9	1.40E-6
	合計	279.0	36.8	46.1	359.3	363.7	0.99E-6
2 案 PC 桁橋	上部工	88.3	26.4	22.4	137.1	171.2	0.80E-6
	下部工	159.0	35.1	27.5	221.6	156.4	1.42E-6
	合計	247.3	61.5	49.9	358.7	327.6	1.09E-6
3 案 RC 橋	上部工	96.6	26.1	21.9	144.6	152.3	0.95E-6
	下部工	176.7	41.4	32.9	250.9	185.2	1.35E-6
	合計	273.3	67.4	54.8	395.5	337.5	1.17E-6

(5) 実務設計への適用

前出の表-3.2 および文献 5) に示す橋梁への適用結果によれば、工費から選定された最適案と炭素排出量から選定された最適案はともに2案となっており、意志決定要因に炭素排出量を用いたとしてもこれまでの意志決定が突然変わってしまうことはないものと考えられる。

しかしながら、今回の試算例にもあるように従来の比較設計における意志決定要因の差が微妙な場合には、炭素排出量を設計における意志決定のツールとすることに大いに意義があるものと考えられる。さらに、橋梁の LCA の特徴は、供用段階の炭素排出量はどんな形式の橋梁を選定しようが基本的に変わらないため、廃棄段階を抜きにすれば、われわれ橋梁設計者が従来工費を算定するために行ってきた数量計算を用いて、これに炭素排出原単位を乗ずるだけで炭素排出量が計算できてしまうというところにある。もちろん、実務における橋梁比較設計に LCA を適用するためには、さらに作業を単純化する必要のあることは感じるが、本試算例に準拠して、比較案の炭素排出量を算出することは現時点で、単なる橋梁設計者にも可能となったといえる。

4. おわりに

小委員会の活動は3カ年をもって終了したが、橋梁への適用例に示したように実務設計、特に土木構造物の形式選定に係わる意志決定のためのツールとして、すでに現段階として利用可能な段階に達しているものと考えられる。今後は、如何にして、環境問題を生業にしない人による構造物設計に、LCA を適用していくかが大きな課題である。

なお、橋梁の LCA の試算に際して多大な協力を頂いた山上裕氏には末筆ながら厚く感謝いたします。

参考文献：1) 盛岡：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例、2) 酒井：土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定、3) 小泉他：ダム建設のライフサイクル評価、以上第4回地球環境シンポジウム講演集、4)～6) 土木学会地球環境委員会環境負荷評価(LCA)検討小委員会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討小委員会 平成6,7,8年度 調査研究報告書、7) (社)建設機械が協会：建設機械等損料算定表 平成8年度版、8) 土木工事積算研究会編：建設省土木工事積算基準 平成8年度版