

橋梁のライフサイクル環境負荷および建設副産物発生量に関する研究

Lifecycle environmental impact and construction demolition waste of bridges

伊藤義人*, 梅田健貴**, 岩田厚司***

Yoshito ITOH and Kenki UMEDA and Atsushi IWATA

*工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**名古屋大学大学院 工学研究科地圏環境工学専攻 博士課程前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

***名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 博士課程前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

In this study the estimation of environmental impact, cost and demolition waste of bridges in the lifecycle was performed for the first step of the lifecycle analysis. Several scenarios considering the variation of the life time of components and usage of recycled materials were used in the analysis. It was obtained that the characteristics of the minimized girder bridge in the lifecycle CO₂ emission, lifecycle cost and lifecycle demolition waste has advantages compared with those of the conventional bridge.

Key Words: lifecycle environmental impact, lifecycle cost, lifecycle demolition waste, minimized girder bridge

キーワード: ライフサイクル環境負荷, ライフサイクルコスト, 建設副産物, 少数主桁橋梁

1. はじめに

現在, 我々は地球温暖化やオゾン層破壊, 産業廃棄物の増加等, 様々な環境問題に直面している。これらの環境問題の中で, 事象そのものが地球的規模となるグローバルな環境問題としては二酸化炭素濃度の上昇による地球温暖化問題が最も重要となっている。地球の二酸化炭素濃度は, 産業革命以前は280ppmであったのに対して, 1965年~1995年の30年間で約320ppm~360ppm以上と急激な増加傾向にある。また, その排出量については, 1994年で64.4億t-Cといわれており, その中で日本は全排出量のうち約6%を占め, その排出量の多さにおいて世界第4位となっている¹⁾²⁾。

また, ローカルな環境問題ではあるが, 循環型社会を形成し

ていく上で考慮すべき事項として産業廃棄物が挙げられる。各産業における産業廃棄物の発生量は図-1に示すとおり, 建設業において最大の20%となっており, その中でもコンクリート塊およびアスファルト塊の発生量で全体の約70%と, その大部分を占めている。また, その増加率についても, 平成2年度から平成7年度の5年間で倍増しているとの試算もある³⁾。鉄スクラップについては, 早期からリサイクルが進んでいるものの, 老廃鉄くずの発生量自体は図-2に示すとおり建設業界が最大となっており, その約20%を占めているという現状にある⁴⁾。

建設廃棄物は大量に排出される一方で, その減量や再生利用は十分に進んでいないという状況である。他方, 廃棄物を適正に処理するために必要な最終処分場等の廃棄物処理施設につい

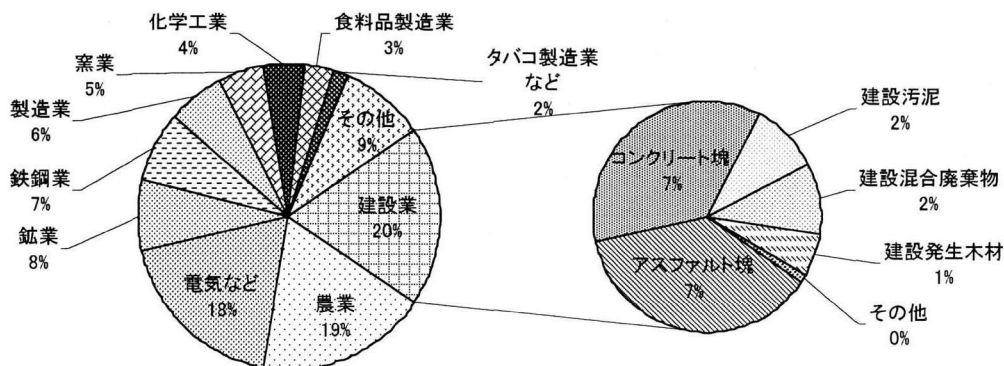


図-1 産業廃棄物発生量の内訳

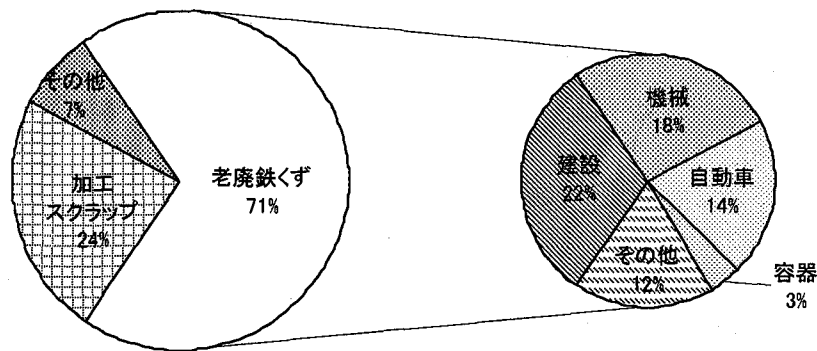


図-2 産業における鉄スクラップ発生量内訳

ては、近年の廃棄物処理に対する住民の不安や不信感の高まりを背景として、その確保がますます困難となっている。厚生省の調査によれば最終処分場の残余年数は、全国平均約2.6年、首都圏で約0.9年といわれている。その他、建設廃材がその40%以上を占める産業廃棄物の不法投棄量は年間約40万トン近く、廃棄物問題の解決が強く求められている。

以上のことから廃棄物の再資源化は緊急の課題となっており、いっそうの推進が急がれているが、そのためには現在の使い捨て資源消費型の社会を国民全体で廃棄物の減量化、再資源化に取り組む社会に再構築することが何よりも必要とされる³⁹⁾。

そこで本研究では、社会基盤として重要な施設の1つである橋梁について、文献 7)で行った検討を補足する形で、新規技術開発されている橋梁と従来型橋梁のライフサイクルにおける環境負荷とコストの算出、およびその比較検討を目的としている。ここで、環境負荷については、従来行われてきた二酸化炭素排出量のみならず、建設副産物についても取り扱う。さらに、建設副産物についてはアスファルト塊、コンクリート塊および鉄スクラップの発生量についての検討を行った。

また、従来行われてきた橋梁 LCA では、主として新規材料を使用するという前提で行われてきたが、本研究ではリサイクル材を用いた場合や、各部材の寿命を変動させた場合など、様々なシナリオについても検討を行った。

2. 橋梁の LCA

2.1 本研究における LCA

本研究における LCA(ライフサイクルアセスメント)のプロセスは、ISO LCA の手法を参考に、それを土木分野に適用できるよう考慮した伊藤らの研究^{7,9)}を参考として、図-3 のようにする。

LCA の第一段階であるライフサイクルの分類においては、本研究において対象とする橋梁のライフサイクルステージを 1)建設段階、2)維持補修段階、そして3)廃棄・架替え段階と3つの段階に分類して、これを研究の範囲と設定し、環境負荷およびコストの試算を行うこととする。

LCA の第二段階である評価のために必要な原単位の収集については、文献 7)を参考にして、土木学会の地球環境小委員会において積み上げ法によって算出された原単位¹⁰⁾および建設省土木研究所において算出された原単位¹¹⁾をもとに、独自に算出した原単位を使用した。

建設副産物発生量については、橋梁の資材数量のデータより直接算出することとした。対象とする建設副産物は、鉄スクラップ、アスファルト塊およびコンクリート塊とした。アスファルト塊およびコンクリート塊は、図-4 に示すようにして処理または処分され、再利用されるものについては図-5 に示すように建設副産物が発生した工事現場または、再生処理工場で再生処理された後に他の工事で利用される³⁾。

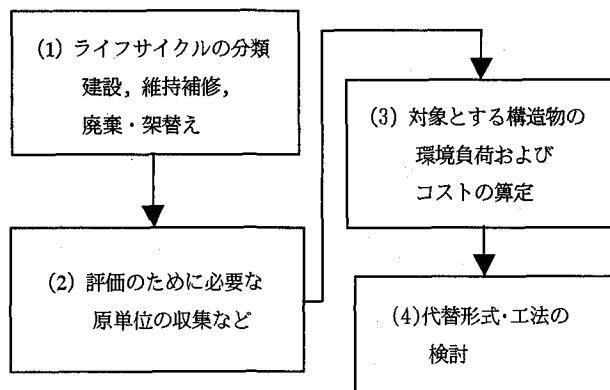


図-3 本研究における LCA 手法の適用

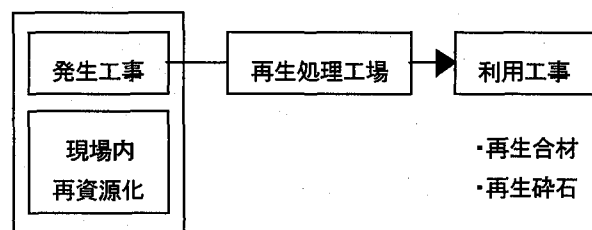


図-4 アスファルト塊およびコンクリート塊の再生利用

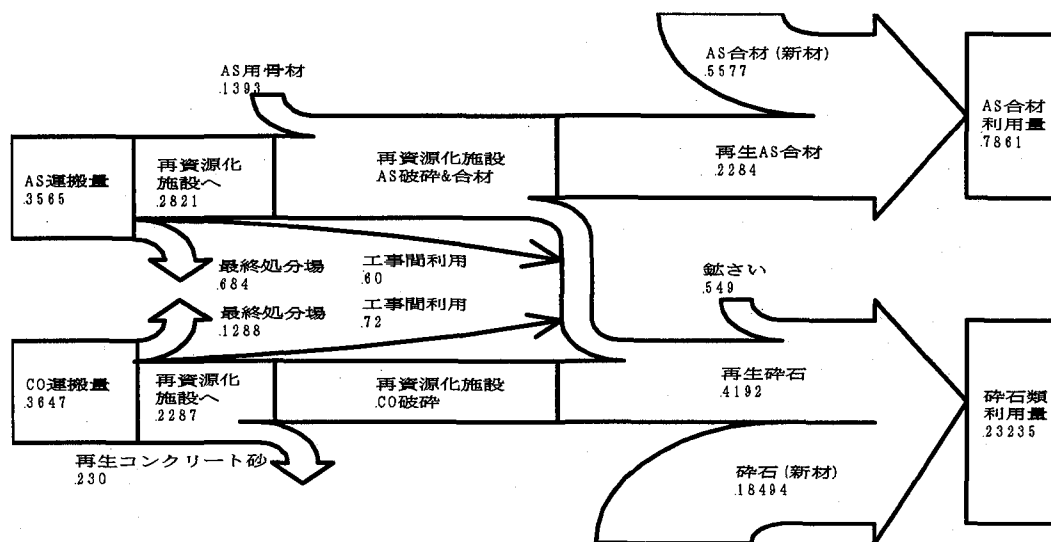


図-5 アスファルト塊、コンクリート塊の再資源化フロー⁵⁾ (単位: 万トン)

このように、実際のところはアスファルト塊およびコンクリート塊のそれぞれについて、処理・処分されるまでの経緯が異なるために、例えば、鉄筋との分別を行わなくても良い無筋のコンクリート塊と分別を行う必要のある有筋のコンクリート塊を同様に扱うことは不適切であると考えられる。そのため、分別の手間などを組み入れた評価を行う必要がある。よって、本研究においては、建材再資源化問題検討委員会⁴⁾において示されているアスファルト塊、コンクリート塊(無筋)、そしてコンクリート塊(有筋)各々の再資源化施設受け入れ価格の比率(表-1)を用いて計算することとした。

LCAの第三段階である対象とする構造物の環境負荷およびコ

表-1 各建設廃棄物の再資源化施設受け入れコスト

項目	価格(円/m ³)	比率
アスファルト・コンクリート塊	920	1.00
コンクリート塊(無筋)	1,020	1.11
コンクリート塊(有筋)	1,560	1.70

スト算定のところでは、実際にライフサイクル全体における二酸化炭素排出量および建設副産物発生量を算出する。また、同時にライフサイクルコストについても算出を行う。

LCAの第四段階の代替工法・工法の検討では、実際に算出された構造物の二酸化炭素排出量、建設副産物発生量、そしてコストの観点から、どのような違いが出るかを考察するとともに、LCAを行うにあたって、どの仮定による影響が大きいかなどについても検討し、少数主桁橋梁の新技术に関する考察も行う。

2.2 対象橋梁の条件設定

ここで、対象とする橋梁は道路公団の第二東名高速道路にお

表-2 評価の対象とする橋梁の条件の比較

	少数主桁橋梁	従来桁橋梁
構造系式	鋼連続非合成I桁橋	鋼連続非合成I桁橋
橋長	173.4m	199.7m
幅員	15.5m	15.73m
スパン構成	39.6,40.3,42.5,51.0m	40.5,42.6,49.5,67.1m
床版形式	プレキャストPC床版	RC床版
床版厚	27cm	24cm
主桁本数	3主桁	6主桁
主桁高	2.9m	2.5m
連結法	現場溶接	ボルト接合

いて架設されている少数主桁橋梁(3主桁橋梁)および、それに準ずる規模の従来桁橋梁(6主桁橋梁)である。図-6, 7に少数主桁橋梁および従来型橋梁である多主桁橋梁の概念図を、また、表-2に各種条件を示す。なお、今回評価に用いた橋梁の構造や使用された部材数、その他各種設定条件については文献⁷⁾と同じである。

2.3 LCAの各段階における条件設定

(1) 建設段階における条件設定

第一ステージの建設段階においては、上述した橋梁が建設される場合の環境負荷およびコストを算出する。考慮する部材は、1)床版で使われるコンクリート、鉄筋、PC鋼棒、2)主桁などで使用される各種鋼材、3)支承、4)伸縮継手、5)舗装で使用するアスファルト 6)塗装である。ヒアリングにより橋梁架設方法はトラッククレーン工法とし、各種建設機械の稼動時間などは、文献⁶⁾における各種の数量と、文献¹¹⁾を参考にして算出する。

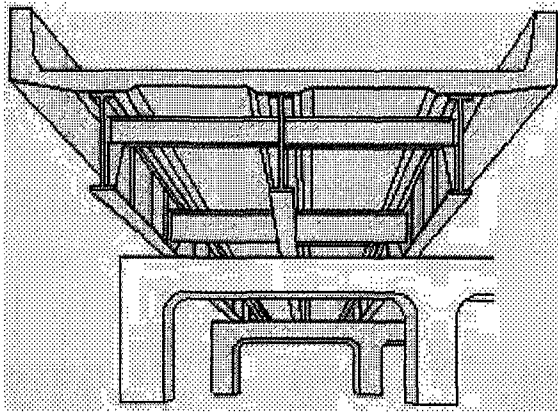


図-6 少数主桁橋梁の概念図

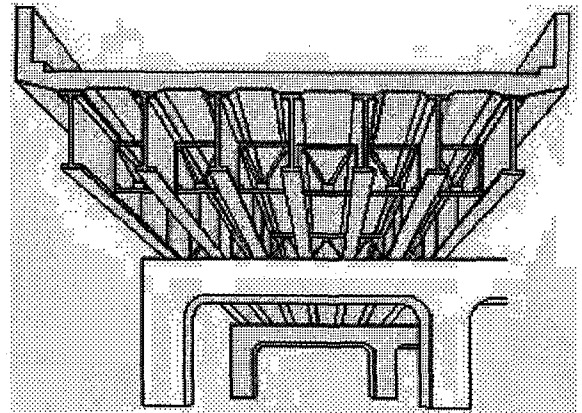


図-7 従来型橋梁の概念図

なお、建設段階における環境負荷およびコストの算出方法は以下のとおりである。

$$E_C = E_{Cm} + E_{Cw} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

資材の環境負荷

$$E_{Cm} = M_n \times U_{co2} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

建設機械の環境負荷

$$E_{Cw} = (G \times U_g + W_w \times U_w + W_l) \times W_h \cdot \cdot \cdot (3)$$

$$C_C = C_{Cm} + C_{Cw} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

ここで、

- E_C, C_C = 建設段階の環境負荷およびコスト、
- E_{Cm}, C_{Cm} = 資材による環境負荷およびコスト、
- E_{Cw}, C_{Cw} = 建設機械による環境負荷およびコスト、
- M_n = 資材の数量、
- U_{co2} = 資材の CO₂ 原単位、
- G = 建設機械の 1 時間の燃料消費量、
- U_g = 燃料 1 ㍑の CO₂ 原単位、
- W_h = 建設機械の稼働時間、
- W_w = 建設機械の重量、
- U_w = 建設機械 1ton の CO₂、
- W_l = 建設機械の耐用年数。

環境負荷で、建設副産物発生量については橋梁自体からの発生量を計算するために式(2)のみを使用して計算を行った。また、建設段階においては、建設副産物は発生せず、維持補修段階および廃棄・架替え段階において発生するものとした。その他、維持補修段階、廃棄・架替え段階における資材の環境負荷、および、建設機械の環境負荷についても同様の考え方で算出した。

(2) 維持補修段階における条件設定

第二ステージの維持補修段階においては、橋梁の各部材についての寿命を設定し、各部材の寿命到来時にそれらを取り替える事によって、橋梁自体の寿命まで供用していくと仮定した。

本来は、橋梁の架設された場所による環境条件や交通量などの供用のされ方により、各部材および橋梁自体の寿命は異なってくるため、寿命を固定して考えることは難しい。しかし、ライフサイクル評価を行うにあたっては、それぞれの寿命を決定する必要があるために、本研究においては文献 3) および文献 7) を参考にして寿命を設定し、環境負荷およびコスト的にも重要であると考えられる a) 橋面舗装、b) 床版、c) 塗装、d) 伸縮継手、e) 支承の 5 つの部材を対象として、その特徴をとらえることとした。ここで、本研究で仮定した寿命を表 3 に示す。

表 3 各部材の寿命および補修間隔

材名	本研究で仮定した寿命 L_i
a) 橋面舗装	15 年
b) 床版	PC 床版：100 年、 補修は 50 年 RC 床版：40 年、 補修は 30 年
c) 塗装	20 年
d) 伸縮継手	20 年
e) 支承	30 年

なお、床版の補修については従来型橋梁の RC 床版では、各種の補修方法が考えられるが本研究においては上面増厚工法によるデータを手に入れることができたために、上面増厚工法を用い床版の補修を行うこととした。同様に、少数主桁橋梁の PC 床版では間詰コンクリートの取替えによって補修を行うこととした。ここで、維持補修段階における環境負荷およびコストの算出方法を式(5)、(6)に示す。

$$E_M = \sum_{i=1}^S (E_{iMm} + E_{iMw}) \frac{L}{L_i} \cdot \cdot \cdot (5)$$

$$C_M = \sum_{i=1}^S (C_{iMm} + C_{iMw}) \frac{L}{L_i} \cdot \cdot \cdot (6)$$

ここで、

E_M, C_M = 維持補修段階の環境負荷およびコスト,
 E_{iMn}, C_{iMn} = 資材による環境負荷およびコスト,
 E_{iMw}, C_{iMw} = 建設機械による環境負荷およびコスト,
 L = 橋梁寿命,
 L_i = 各部材の寿命.

(3) 廃棄・架替え段階における条件設定

第三ステージである廃棄・架替え段階においては、橋梁が架設されている場所の地理的条件および車両交通状態によって架替え方法や工法が異なる。しかし、各種架替え工法についての、建設機械の稼働時間やコストなどを把握できるような文献がほとんどなく、必要なデータを得るのは非常に困難であった。そこで、本研究では廃棄(旧橋撤去)について、伊藤らの文献において使われている橋梁台帳データ橋梁撤去費用の平均値を用いることとした。ここで、廃棄・架替え段階における環境負荷およびコストの算出方法を式(7)、(8)に示す。

$$E_R = E_{Rw} + E_C \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$C_R = C_{Rd} + C_{Cd} \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

E_R, C_R = 廃棄・架替え段階の環境負荷およびコスト,
 E_{Rw} = 旧橋撤去時の建設機械による環境負荷,
 E_C = 建設段階における環境負荷,
 C_{Rd} = 旧橋撤去費用,
 C_{Cd} = 架替えにかかるコスト(新設コストと同様).

2.6 ライフサイクル試算範囲の設定と割引率の検討

LCA は本来、製品のライフサイクルに関わるすべてのプロセスを対象として行うべきであり、その趣旨からすれば、LCA の対象と関連する全てのものを対象とする必要がある。このことは、例えば、本研究においては建設機械を生産するための資本財までも考慮する必要があることになる。

しかし、建設機械を生産するための生産設備からの環境負荷については参考文献⁷⁾と同様、ここでは考慮しないこととする。また、ライフサイクルコストにおける割引率 r についても同参考文献⁷⁾で既に検討されており、ここでは $r = 0\%$ で計算を行うこととする。

今回のLCAにおいては、以上のような仮定を用いたが、割引率の設定に関しては、今後さらなる検討が必要であるといえる。

3. ライフサイクル環境負荷およびコストの計算

3.1 ライフサイクルにおける環境負荷とコストの比較

図8と図9に従来型橋梁と少数主桁橋梁のライフサイクルにおける環境負荷およびコストの比較を示す。ここで、実線は少数主桁橋梁の結果を表し、破線は従来型橋梁の結果を表す。橋

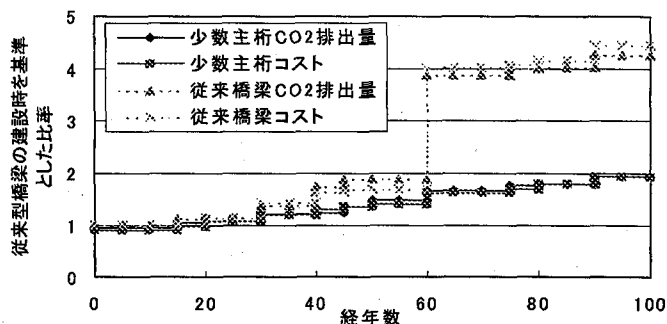


図8 二酸化炭素排出量およびコストの比較

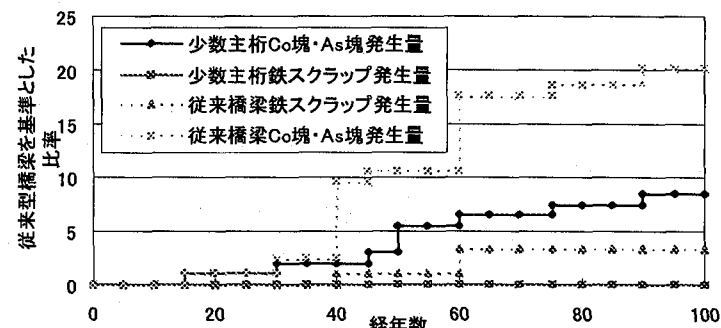


図9 Co塊・As塊発生量と鉄スクラップ発生量の比較

梁の各部材の寿命は表3の値を適用した。図中の縦軸は、コストおよび二酸化炭素排出量については、従来型橋梁の建設時におけるコストおよび二酸化炭素排出量を1とした場合の比率を、建設副産物については維持補修段階において最初に発生する発生量を1とした場合の比率を表す。ここで、コンクリート塊とアスファルト塊の発生量については、全体としての発生量の把握を主としているため、コンクリート塊とアスファルト塊を足し合わせた量(図8および図9では「Co塊・As塊」と表示)とした。

図8より、建設時における従来型橋梁の二酸化炭素排出量については、少数主桁橋梁の方が10%程度排出量を小さくできることとなった。しかし、100年と設定されたライフサイクル期間全体を通してみた場合については、2倍以上の差があることが分かった。これは、従来型橋梁は建設後60年の時点において、架替えが行われていることが大きな要因と考えられる。なお、従来型橋梁の架替え寸前の時点においても、従来型橋梁は少数主桁橋梁よりも30%程度二酸化炭素排出量が多い状態にある。このことは、従来型橋梁は床版にRC床版を使用しているために、維持補修の段階において、床版の補修および取替えを行う必要があるためと考えられる。

一方、コストについてのヒアリングでは、建設時のコストは少数主桁橋梁の方が従来型橋梁より5~10%低く抑えることができるという結果であったが、対象とする橋梁については、それぞれの橋梁を1tonあたりのコストに換算すると、従来型橋梁では約100万円、少数主桁橋梁では約90万円と、少数主桁橋梁は約10%近く安価に建設することができるとことが分かった。ライフサイクル全体を通してみると、維持補修段階において、従来型橋梁は少数主桁橋梁の2倍以上のコストがかかる結

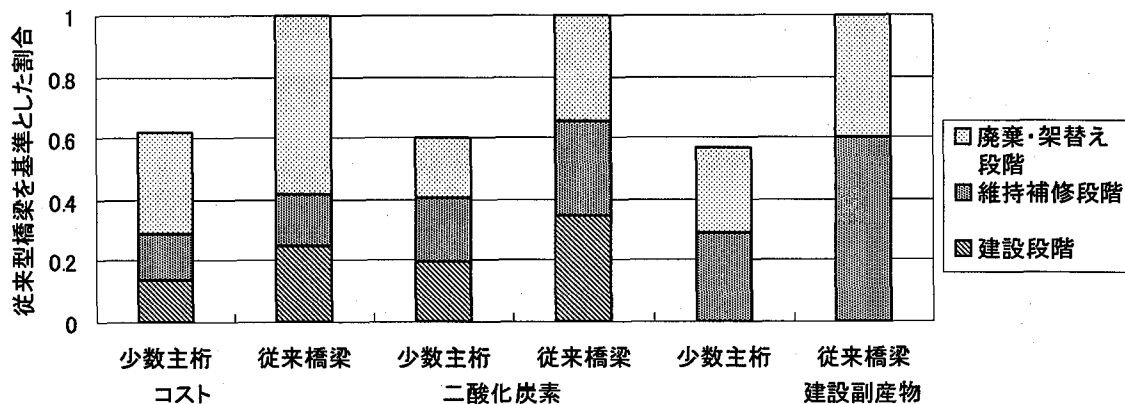


図-10 各段階における環境負荷とコストの内訳

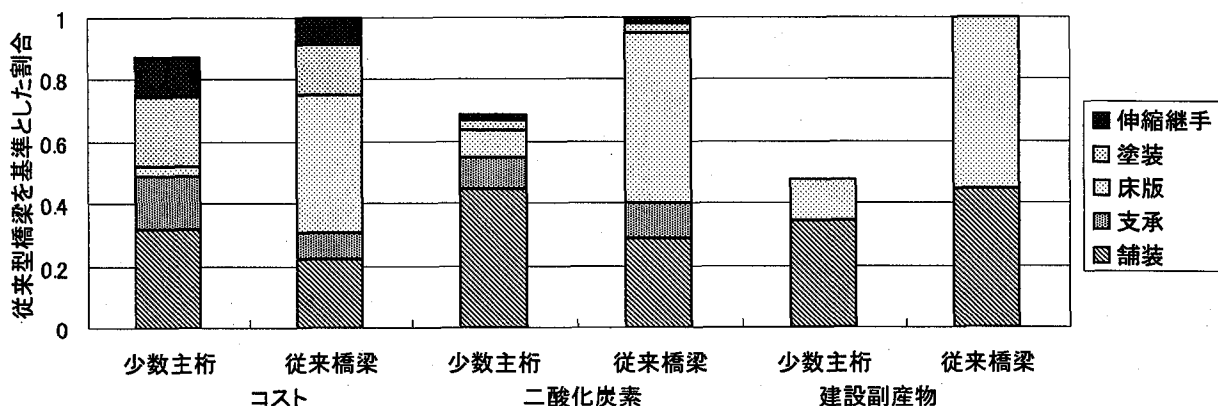


図-11 維持補修段階における各部材のコストおよび環境負荷の比較(年ベース)

果となった。これは、従来型橋梁は架替えが行われているのが一番の要因であると考えられる。なお、橋梁の架替え寸前の段階において比較しても、従来型橋梁の方が少数主桁よりも30%以上コストが高くなっている。これは、環境負荷の場合と同様に、従来型橋梁においては、RC床版を使用しており、維持補修のためにRC床版を補修および打替える必要があること、そして、塗装の塗替えにおいて、従来型橋梁は少数主桁橋梁より塗装面積が60%以上大きいために、塗装塗り替えのためのコストがかかると考えられる。

建設副産物発生量については、ライフサイクル全体でみると従来型橋梁は少数主桁橋梁の2.4倍程度の発生量がある。また、従来型橋梁の架替え寸前においても2倍近く発生量が多くなっている。これは橋梁架替えによる影響も大きい。従来型橋梁におけるRC床版の打替えの影響もかなり大きいといえる。なお、鉄スクラップ発生量は、ライフサイクルにおいては、従来型橋梁のみに発生する結果となった。これは、少数主桁橋梁に用いられているPC床版の寿命を100年と仮定しているためである。また、少数主桁橋梁の廃棄・架替え段階までを含めると、従来型橋梁は少数主桁橋梁の1.9倍程度の発生量となった。これは、従来型橋梁は廃棄・架替え段階のほかに床版の打替えによっても発生するが、床版の打替えによって発生する鉄スクラップは廃棄段階において発生される鉄スクラップの約1/3と大きな割合を占めているためと考えられる。また、少数主桁橋梁お

よび従来型橋梁の廃棄・架替え段階において発生する鉄スクラップは、橋梁の大きさがほぼ同等であるために、差は見られなかった。

次に、図-10に、少数主桁橋梁および従来型橋梁のそれぞれの建設段階から廃棄段階にいたるまで(少数主桁橋梁は100年、従来型橋梁は60年)のライフサイクルコストおよび環境負荷を年ベースに換算した内訳を示す。縦軸は従来型橋梁のコスト、二酸化炭素排出量、そして建設副産物発生量を1とした場合の割合である。年ベースに換算して比較を行うのは少数主桁橋梁、従来型橋梁の寿命が違うためである。ここでは、廃棄・架替え段階における橋梁の架替えに伴う環境負荷およびコストは含めず、橋梁の架設から廃棄までの期間で比較する。

一般に、少数主桁橋梁は、構造を簡素化しているため、維持補修の割合が従来型橋梁より少ないと考えられている。少数主桁橋梁のライフサイクルでのコスト、二酸化炭素排出量、および建設副産物については、それぞれ、60%程度に抑えることができる。これは、従来型橋梁は維持補修段階でRC床版の打替えがあるのに対して、少数主桁橋梁はPC床版を使用しているため床版の打替えを行う必要がないためと考えられる。また、少数主桁橋梁と従来型橋梁の維持補修段階における年ベースの分担量はコストおよび二酸化炭素排出量において大きくは変わらないことが分かった。これは、少数主桁橋梁の維持補修段階において寿命を100年としたため、各部材の取替え回数が従来型橋梁

表4 各部材の寿命を前後させた時の寿命設定

部材名	短寿命	標準寿命	長寿命
橋面舗装	10 年	15 年	20 年
床版補修	PC 床版： 40 年	PC 床版： 50 年	PC 床版： 60 年
	RC 床版： 20 年	RC 床版： 30 年	RC 床版： 40 年
塗装	15 年	20 年	25 年
伸縮継手	15 年	20 年	25 年
支承	25 年	30 年	35 年

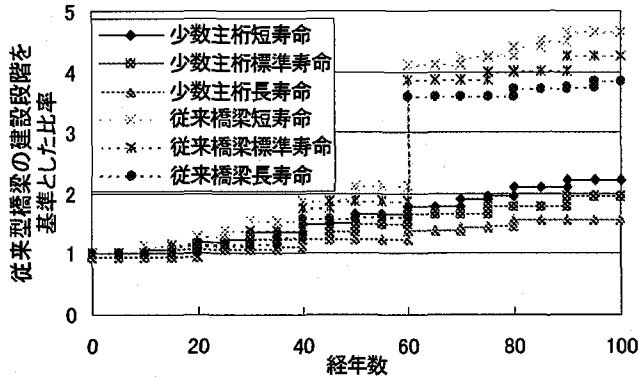


図-12 寿命を変化させた場合の二酸化炭素排出量の比較

と比して多いためであると考えられる。なお、鉄スクラップ発生量については、どちらのタイプの橋梁でも廃棄段階において排出されるのがそのほとんどであるために図には載せなかったが、年ベースにすると、少数主桁橋梁の鉄スクラップ発生量は従来型橋梁と比して 40%程度低く抑えることができることが分かった。これは、少数主桁橋梁、従来型橋梁とも橋梁のサイズが大きく異なっていないのに対して、橋梁の寿命が異なっているためおよび、従来型橋梁では床版の打替えがあるためと考えられる。ただし、どちらの橋梁も廃棄段階におけるコストの割合が建設段階の 2.5 倍程度とライフサイクル全体で大きな割合を占めることが分かる。

図-11 に、維持補修段階の各部材の環境負荷とコストの分担率を年ベースにしたものを示す。縦軸の割合は、従来型橋梁を 1 とした場合の少数主桁橋梁の比率である。この図によると、少数主桁橋梁はコストにおいて約 15%、二酸化炭素排出量においても 30%程度、そして、建設副産物についても 50%程度低く抑えることができ、少数主桁橋梁の方が建設段階と同様に維持補修段階においてもコストおよび環境負荷の面から有利な橋梁形態となることが分かった。

これは、少数主桁橋梁は従来型橋梁と異なり、床版の打替えを行う必要がないため床版からのコストおよび環境負荷を大きく抑えることができ、結果として、維持補修段階のコストおよび環境負荷を低く抑えることができたと考えられる。しかし、どちらのタイプの橋梁も舗装による環境負荷およびコストの割

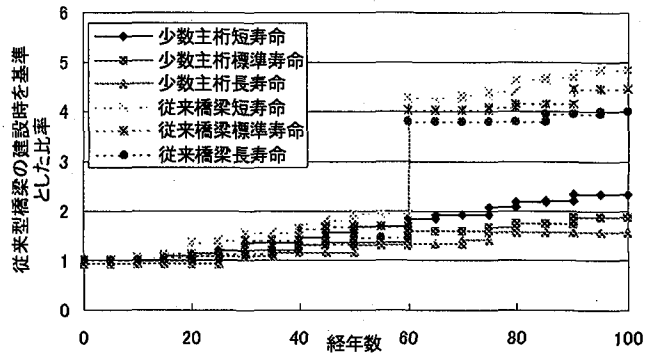


図-13 寿命を変化させた場合のコストの比較

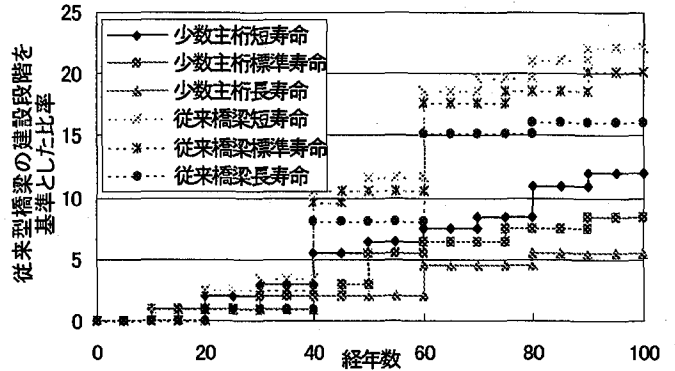


図-14 寿命を変化させた場合の建設副産物発生量の比較

合の大きいことが分かった。また、少数主桁橋梁における舗装、塗装、支承、および伸縮継手からのコストおよび二酸化炭素排出量は従来型橋梁よりも若干大きくなっているが、これは、少数主桁橋梁は従来型橋梁に比して橋梁の寿命が長いために、これらの部材がより多くの回数取替えられるためと考えられる。

3.2 異なるシナリオでの比較

(1) 部材の寿命を変化させた時の環境負荷

本研究において設定した各部材および橋梁の寿命は、ヒアリングなどにより得ることができたごく限られた環境のものである。そこで、各部材の寿命をヒアリングでの値から変化させて計算してみるにより、ライフサイクルにおける環境負荷およびコストについてどの程度の影響が現れるのかについても考察してみる必要があると考えられる。そこで、表4 に示すように各部材の寿命を前後させて計算を行うこととした。この寿命は技術者へのヒアリングにより、最悪、普通、最善の状況を想定した場合に考えられる値として設定したものである。

図-12～図-14 に寿命を変動させた時の結果を示す。なお、実線は少数主桁の結果を表し、破線は従来型橋梁の結果を表す。各部材の寿命が短い場合と長い場合の二酸化炭素排出量、建設副産物発生量、そしてコストは、少数主桁橋梁では、それぞれ1.6倍、2.2倍、1.5倍となり、従来型橋梁では1.3倍、1.4倍そして、1.2倍程度の開きが発生した。どちらのタイプの橋梁も環境負荷、コストの開きが出た最も大きな理由は舗装取替えと考えられる。

寿命を短くした場合は舗装はライフサイクル対象期間内に 9 回行われるのに対して、寿命を長くした場合では 3 回の取替えにとどまるからである。塗装塗替え、伸縮継手取替え、そして支承取替えも、寿命の仮定により取替え回数は変化するが、それでも、舗装取替えほど大きな影響はないことが分かった。また、建設副産物発生量については舗装のほかにも補修回数は少ないが 1 回あたりの建設副産物発生量の大きい床版の補修による影響が大きいことが分かった。

(2) リサイクル材を用いた時の環境負荷

環境負荷の低減という観点から考えた場合、橋梁全体および各部材の寿命を長寿命化させることのほかにも、リサイクル材を使用することにより環境負荷を低減させるという方法も考えられる。リサイクル材を使用する場合はコンクリート塊、アスファルト塊、および鉄スクラップの発生を直接抑えることにも結びつく。よって、ここではリサイクル材使用のシナリオとして 2 つを考える。すなわち、表 5 に示すように建設時からリサイクル材を使用した場合をシナリオ A とし、もう一つは、建設段階は新規材料を使用し、その後は対象橋梁より発生するコンクリート塊、アスファルト塊、および鉄スクラップをリサイクル材として使用していく場合をシナリオ B とし、それらの比較を図-15、図-16 において行う。ここで用いたリサイクル材は、桁材については電炉材を、舗装用のアスファルトは再生アスファルトを、そして、コンクリートは、高炉スラグ 45% 混入のものを使用し、それぞれの材料に関する原単位を用いることで比較検討を行った。

表-5 リサイクル材を用いる仮定

項目	仮定
シナリオ O	建設段階から廃棄・架替え段階すべてに新規材料を使用（これまで行ってきた仮定）
シナリオ A	建設段階から廃棄・架替え段階すべてにリサイクル材を使用
シナリオ B	建設段階のみ新規材料を使用し、その後はリサイクル材を利用

シナリオ A では、建設段階の二酸化炭素排出量は少数主桁橋梁、従来型橋梁ともに新規材料を使用した場合（シナリオ O）に比べて約半分に抑えることができた。リサイクル材を使用した場合の従来型橋梁の二酸化炭素排出量は新規材料を使用した場合の少数主桁橋梁よりも、橋梁建設後 60 年目では 20% 近く低く抑えることができるという結果になった。しかし、ライフサイクル期間である 100 年目で比較すると、リサイクル材料を使用した場合の従来型橋梁よりも新規材料を使用した場合の少数主桁橋梁の方が 40% 近く有利になった。

シナリオ B では建設段階において新規材料を使用しているの、二酸化炭素排出量はどちらのタイプの橋梁も同一である。しかし、維持補修段階を見てみると従来型橋梁の寿命到来時で

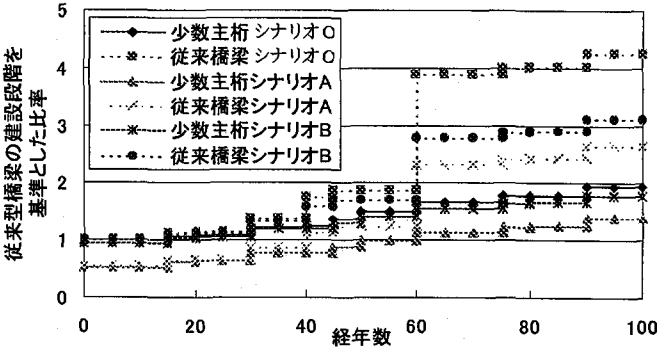


図-15 リサイクル材を用いた場合の二酸化炭素排出量の比較

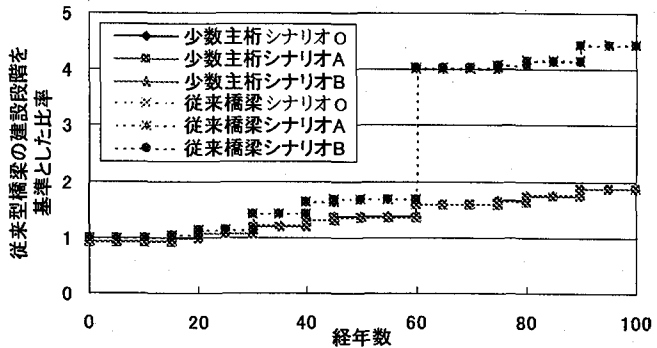


図-16 リサイクル材を用いた場合のコストの比較

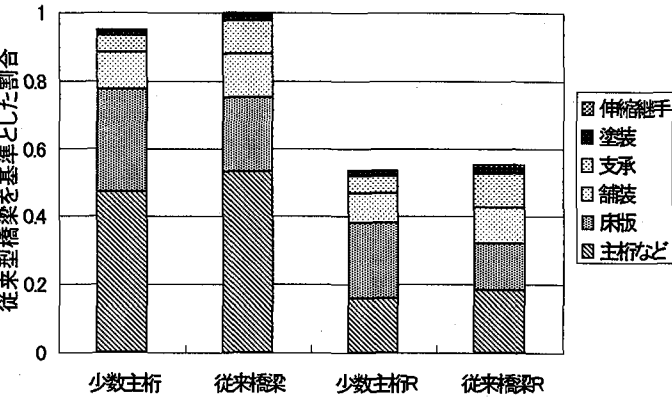


図-17 建設段階における二酸化炭素排出量の内訳

ある 60 年目においては、少数主桁橋梁、従来型橋梁の基準としている仮定よりそれぞれ 10% 程度二酸化炭素排出量を低減できるとどまった。ライフサイクル期間である 100 年目においては、従来型橋梁ではもとの仮定の 30% 程度、少数主桁橋梁では 10% 程度二酸化炭素排出量を低減できることとなった。この開きは従来型橋梁では橋梁の架替えがあるのに対して、少数主桁橋梁には架替えがないためと考えられる。

これらの比較により少数主桁橋梁のように架替えのない橋梁は環境負荷の面から非常に有利になることが分かった。

また、コストについては、建設段階およびライフサイクル期間である 100 年目で、どちらのタイプの橋梁とも 1% 程度シナリオ B の方が安価にすることができるにとどまった。新規材料と

リサイクル材で、どちらともコストにほとんど差がないためと考えられる。

図-17に新規材料で建設を行った場合、そしてリサイクル材を用いた場合それぞれの建設段階における各部材からの二酸化炭素排出量の内訳を示す。なお、図-17中の少数主桁Rおよび従来橋梁Rはそれぞれリサイクル材を用いたものを表わす。

図-17より、主桁などからの二酸化炭素排出量は新規材料を使用した場合の1/3程度と大きく抑えることができた。しかし、床版からの二酸化炭素排出量については少数主桁橋梁では30%程度、従来型橋梁では40%程度とそれほど大きく抑えることができなかった。これは、床版には従来型橋梁、少数主桁橋梁ともに鉄筋が使用されており、PC床版にはPC鋼棒が使用されているが、これらは、今回用いた仮定においても新規材料を用いているため、コンクリートのみリサイクル材料に変更した分の削減量となる。また、舗装の環境負荷はどちらの橋梁も20%程度低く抑えることができることとなった。

4. 結論

本研究において、従来型橋梁および少数主桁橋梁のライフサイクルにおける環境負荷およびコストについての検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) ライフサイクル全体における少数主桁橋梁の建設副産物発生量は、従来型橋梁と比して約半分と大幅に削減することができ、二酸化炭素排出量およびコストのみならず、建設副産物発生量の観点からも優れた橋梁であることを示した。
- 2) 部材の寿命を5年～10年長くした場合、二酸化炭素排出量で0.6倍、建設副産物発生量で0.5倍、コストで0.8倍と、大幅に減少することを示した。
- 3) リサイクル材を用いることにより、二酸化炭素排出量を建設段階において約半分程度に、ライフサイクル全体でも従来型橋梁で約30%、少数主桁橋梁で約10%低減できることを示した。
- 4) リサイクル材を用いても、コストを大きく削減することはできないが、二酸化炭素排出量、建設副産物発生量といった物質循環の観点からは、リサイクル材を使用することが必要であることを示した。

現段階におけるLCAの問題点としては、以下のものが挙げられる。

- 1) 橋梁の各部材の寿命および、橋梁全体の寿命を異なる環境のもとで供用される場合でも考慮できるモデルがないため、仮に架設地点が特定されても十分な精度で寿命を推定し、ライフサイクルコストや環境負荷が算定できない。今後、暴露実験、環境促進実験、および現地観測などを行い、その結果を反映させていく必要がある。
- 2) 橋梁架替えに関するコストおよび環境負荷については

ライフサイクル全体の中で大きな割合を占めるため、それらに関するデータを今後とも収集し、その精度を高める必要がある。

- 3) 交通量が多く架替えが行えないような都市部における橋梁の寿命延長に関する技術開発を行い、その評価モデルを作る必要がある。

本研究を行うにあたって、資料提供など、有用な情報の提供にご協力くださった、道路公団、名古屋市、横河ブリッジ、NKK、前田道路、日鐵溶接工業、東洋設計などの技術者の方々に深く感謝いたします。

また、本研究の一部は平成11年度の文部省・科学研究費補助金・基盤研究(B)(研究代表者:伊藤 義人)として研究補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 田邊敏明, 地球温暖化と環境外交 京都会議の攻防とその後の展開, 東京時事通信社, 1999.
- 2) 細田衛士, 寺出道雄, ゼミナール 地球環境論, 慶應義塾大学出版会株式会社, 1999.
- 3) 建設副産物リサイクル広報推進会議, 総合的建設副産物対策・現場で実効のある対策の推進のために-平成10年度版, 1997.
- 4) 建材再資源化問題検討委員会, 建築廃棄物の実態と将来動向整理, 1999.
- 5) 日本鉄鋼協会, 循環型社会における金属系材料の在り方に関する調査報告書, 2000.
- 6) 伊藤義人, 河合亜紀, コンクリート副産物の発生量予測とそのリサイクルに関する研究, 土木情報システム論文集, Vol.6, pp.71-78, 1997.
- 7) 伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣, 少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1295-1306, 2000.
- 8) L. Sunuwar, Y. Itoh, H. Nagata, T. Nishido, Characteristics of Environmental Impact of Bridges for Type Selection, Journal of Civil Engineering Information Processing System, Vol.6, JSCE pp.173-180, 1997.
- 9) 伊藤義人, 永田裕規, スカ ラケマ, 西川和廣, 地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1306, 1999.
- 10) 土木学会, 土木学会地球環境委員会編: [基調報告 I] 土木と地球環境, 地球環境委員会設立シンポジウム資料集, 1992.
- 11) 建設省土木研究所, 土木研究所資料 資源・エネルギー消費, 環境負荷の算定手法の開発と実態調査報告書(その 2) 平成 6 年 3 月, 1994.
- 12) Yoshito Itoh, Amin Hammad, Chunlu Liu, Yoji Shintoku, Network-Level Bridge Life-Cycle Management System, Journal of Infrastructure System Vol.3 pp.31-39, 1997.
- 13) Dan M. Frangopol, Optimal Network-Level Bridge Maintenance

Planning Based on Minimum Expected Cost, US-Japan Joint Workshop on LCC Analysis and Design of Infrastructure System in Hawaii, 2000.

- 14) 財団法人 高速道路技術センター, 平成9年度 第二東名高速道路 鋼少数主桁橋梁の設計施工に関する調査研究 その4 資料編 (日本道路公団 名古屋建設局委託) 平成10年3月, 1998.
- 15) 建設省道路局国道課, 鋼道路橋数量集計マニュアル(案), 1998.
- 16) 建設工事積算研究会, 土木工事積算基準マニュアル 平成9

年度版, 1997.

- 17) 社団法人 日本建設機械化協会, 橋梁架設工事の積算 平成7年度版, 1995.
- 18) 財団法人 建設物価調査会, 建設機械価格・損料算定資料, 1997.
- 19) 財団法人 建設物価調査会, 建設物価 1月号, 1997.
- 20) 社団法人 日本橋梁建設協会, 新しい公共の誕生 公共事業のコスト縮減を目指して, 1998.

(2000年9月14日 受付)