

合理化橋梁のライフサイクルアナリシスに関する研究

Lifecycle analysis of rationalized steel bridges

坪内佐織*, 伊藤義人**, 金 仁泰***

Saori TSUBOUCHI, Yoshito ITOH, In-Tae KIM

*大学院生, 名古屋大学大学院, 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

**工博, 名古屋大学大学院教授, 附属図書館長, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

***博(工), 名古屋大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

In the construction industry, minimizing the usage of material resources and energy to preserve the global and regional environments is required to reduce the environmental impact. The longevity of civil structures is one of the useful methods to reduce the lifecycle cost (LCC) and lifecycle CO₂ emission (LCCO₂) during the construction, maintenance and replacement stages of structures. In this study, the lifecycle analysis of newly developed bridges, named the minimized girder, the rationalized box-girder and the rationalized truss bridges in Japan, was performed. The lifecycle analysis of the conventional bridges, I-girder, box-girder and truss bridges, were also performed and compared with those of the newly developed bridges. It was found from the analysis that the newly developed types of the bridges have not only less total LCC but also less total LCCO₂ than the corresponding conventional bridges. The characteristics of the LCC and LCCO₂ during maintenance stage of the bridges were discussed.

Key Words: lifecycle cost, lifecycle CO₂ emission, rationalized bridge

キーワード: ライフサイクルコスト, ライフサイクル環境負荷, 合理化橋梁

1. はじめに

国際的に環境問題への関心が高まっており¹⁾, 建設分野においても環境負荷を削減する対策が求められている. そのため, 社会基盤施設のライフサイクルにおけるコスト(LCC)のみならず, 二酸化炭素排出量で代表される環境負荷(LCCO₂)についても十分検討する必要がある.

地球温暖化の影響を直接扱った日本の研究としては, 松岡ら^{2)~3)}の研究が代表的である. 地球温暖化対策を扱った研究には, 土木分野での構造物を対象として, 建設時の二酸化炭素排出量を評価したものが多い. 土木学会地球環境委員会 LCA 小委員会では, 土木構造物の二酸化炭素排出量を算出するための原単位整備と, ダムやトンネル等の構造物の建設時における二酸化炭素排出量の試算を行っている⁴⁾. 旧建設省土木研究所の研究では, 省エネルギー技術の評価を目的として, 構造物の従来工法と省エネルギー工法の二酸化炭素排出量及びコストの比較が行われ, 環境問題とコストの両面において最適となる工法を示唆している⁵⁾. さらに, 伊藤ら⁶⁾の研究では, 経済性や景観等を指標として橋梁形式の選定を支援するための橋梁形式選定システムに環境負荷の項目を付け加え, 橋梁形式選定の際に地球温暖化問題にも対応できるようなシステムを構

築している. また, 構造物のライフサイクルについて, サービスによる二酸化炭素排出量, すなわち通過交通からの二酸化炭素排出量を算出して環境負荷の評価を行ったものとして加藤ら⁷⁾の研究が挙げられる. さらに, Horvathら⁸⁾は鋼橋とコンクリート橋を比較して, 有害廃棄物をも考慮した環境負荷評価を行っている.

橋梁分野では, 新たな技術を用いて構造を簡素化することによりコスト低減を達成した合理化橋梁が普及しつつある. 合理化橋梁は従来型橋梁より総工事費を約 15%削減することを目標としているが, ローメンテナンス化等も実現しており, コストのみならず環境負荷も低減できると予想される. 既に, 合理化橋梁の一つである少数主桁橋梁の環境負荷については従来型橋梁のそれより低減できるという試算が行われているが^{9)~14)}, その他の合理化橋梁においては, まだ十分な検討がされていない.

本研究では, 標準的な橋梁形式である I 桁橋, 箱桁橋, トラス橋の三種類を対象として, それぞれの従来型橋梁とそれに対応した合理化橋梁について, 支間長を変化させて LCC と LCCO₂ を定量的に試算し, それぞれの結果を比較検討することにより, 合理化橋梁のライフサイクルアナリシスを目的としている. 試算の際に考慮する橋梁の供用期間は, 現行の道路橋示方書¹⁵⁾に従い, 100 年と設定した.

従来型橋梁の供用期間を100年とするには多少無理があるが、種々の部材や部品を更新することにより対応できるものとした。

2. 本研究における橋梁のLCA

本研究における橋梁のLCA(ライフサイクルアセスメント)は、図-1に示すプロセスに従い行った^{9,9)~14)}。これはISO LCA手法を参考に、それを社会基盤施設に適用できるように考慮されたものである。

LCA 第一段階ではライフサイクルの分類を行う。本研究では、対象とする橋梁の建設から廃棄までを1サイクルとし、それを初期建設段階、維持管理段階、廃棄段階の3ステップに分け、これを解析の範囲と設定する。なお、リサイクル材の考慮は文献11)で検討しており、同様な結果になることが予想されるので、本論文では扱わない。

LCA 第二段階では、評価のために必要な原単位等の収集を行う。

本研究では、原単位を土木学会地球環境委員会 LCA 小委員会の推奨値¹⁶⁾を基本的に用いることとした。同委員会では産業関連分析法と積上法を合体させる方法を提案し、一体となった原単位を提示している。主な原単位を表-1に示す。

LCA 第三段階では、対象とする構造物のLCC及びLCCO₂を実際に試算する。環境負荷は、二酸化炭素排出量に換算している。

LCA 第四段階では、代替形式・工法の検討を行う。ここでは構造形式や支間長の違いによるLCC及びLCCO₂を比較検討し、それぞれの特徴について考察する。

3. 新形式橋梁と設計供用期間の延長について

3.1 新形式を用いる必要性

図-2に示すように、供用期間が50年以上となる橋梁数の全体橋梁数に対する割合は現在1割程度であるが、今後急激に増加すると予想されており、2030年には全体橋梁数の約5割まで達するといわれている¹⁸⁾。この傾向は、維持管理において大きな問題となることは、米国の前例からも明らかなことである¹⁹⁾。

米国では、図-3に示すように、橋梁の架設ピークを1930～1950年に迎えており、日本と比べ早くから橋梁の老朽化問題が叫ばれていた。1930年代から集中的に社会基盤を整備した結果、維持補修・補強が必要な橋梁が同時期に発生して、深刻な資金不足に陥った¹⁹⁾。

日本においては、1960年代から1990年代にかけて集中的に橋梁を建設したため、米国以上に集中した維持補修費負担が予想され、維持管理におけるコストを削減していく方向性を見出すことは非常に重要な課題と言える。

このような背景の下、最近の社会的ニーズである「公共工事コスト削減」に対応するため、橋梁分野では新しい構造形式や施工方法の検討・導入を積極的に行っている。本

研究ではこれらの一環として、近年採用が増加しつつある合理化橋梁を対象とし、コストと環境負荷の両面からライフサイクルアナリシスを行う。

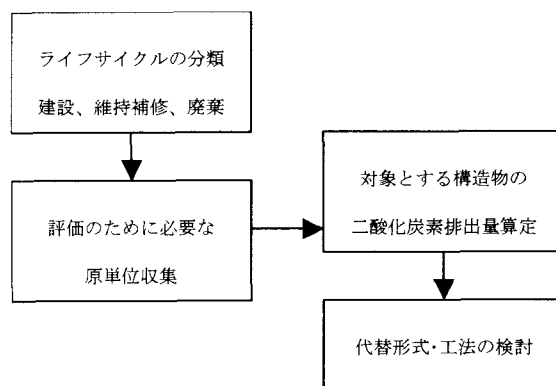


図-1 本研究におけるLCA手法

表-1 主な原単位

	単位	原単位(kgC/単位)	出展
鋼材	t	411	土木学会
コンクリート	m ³	84.9	土木学会
塗装	t	452	土木学会
アスファルト	t	11.3	土木学会
型枠	m ³	41.5	鋼材倶楽部 ¹⁷⁾

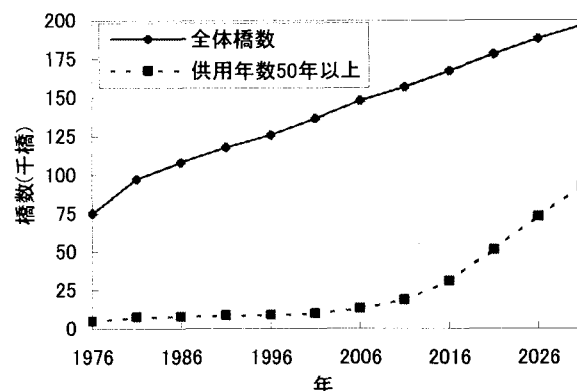


図-2 国内における供用50年以上の橋梁の将来予測

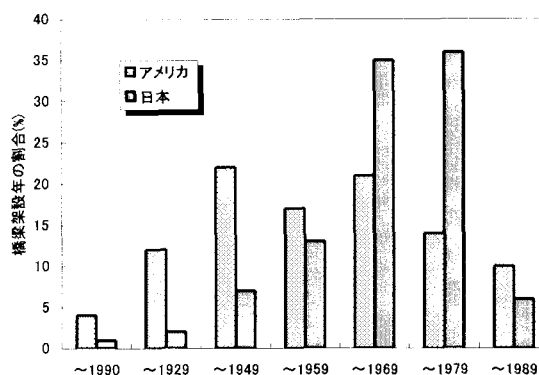


図-3 米国と日本における橋梁架設状況の比較

3.2 従来型橋梁の設計供用期間延長について

従来、日本の通常の橋梁は供用期間を 50～60 年程度と設定した上で設計、施工及び維持管理を施していたが、3.1 の背景に加え、従来の規定を用いて設計された構造物に大きな支障が生じていないことや、LCC の小さい社会基盤への転換により、設計上の供用期間として 100 年を採用することが道路橋示方書¹⁵⁾により示された。本研究ではこのような動きをふまえ、橋梁の設計供用期間を 100 年と設定し、各種の合理化橋梁と従来型橋梁の LCC 及び LCCO₂ の試算を行う。

3.3 各対象橋梁の合理化橋梁

対象とする合理化橋梁は、I 桁橋では少数主桁橋梁^{20)～22)}を、箱桁橋では開断面箱桁橋梁^{23)～25)}と細幅箱桁橋梁^{23)～25)}を、トラス橋では合理化トラス橋梁²⁶⁾を対象とした。これらの合理化橋梁の特徴を以下に示す。

(1) 少数主桁橋梁

少数主桁橋梁は、プレストレスト・コンクリート床版(PC 床版)を用いて床版支持間隔を大きくすることにより、主桁本数を少なくし、横桁・横構等の構造部材を単純化または省略して合理化を図った橋梁構造の一つである。

従来型 I 桁橋梁と比較すると、図-4 に示すように主桁本数の削減や横構の省略等を施すことにより構造が簡素化されていることが分かる。また、図-5 に示すように、少数主桁橋梁の溶接延長、小型材片数、大型材片数、塗装面積及び鋼重は従来型橋梁のそれを 100 としたとき、それぞれ 40、60、40、60、95 となり、維持管理費の低減が図られている。

その他に、部材数の減少による景観性の向上、現場作業の機械化・自動化による架設作業時の安全性向上等も特徴として挙げられる。また、標準的な支間長は従来型の連続非合成 I 桁橋梁においては 30～60m であるのに対し、少数主桁橋梁は水平継手を採用した場合、最大 90m 程度まで延長可能となっている。

(2) 開断面箱桁橋梁及び細幅箱桁橋梁

開断面箱桁橋梁は、図-6(b)に示すように上フランジ部材を I 桁と同様の構成とし、床版と合成させ、鋼断面は開断面(逆台形)を形成する箱桁である。床版は PC 床版を採用し、腹板間隔を広げることにより一箱桁化し、縦桁・横桁等の床版構造を大幅に省略している。

細幅箱桁橋梁は、図-6(c)に示すように少数主桁橋梁と同様に PC 床版を用いて床版支持間隔を広くすることにより、桁断面を削減し、横構等の構造部材を単純化または省略して合理化を図っている。

鋼重等の比較を図-7 に示す。図-7 より、少数主桁橋梁と同様に、開断面箱桁橋梁と細幅箱桁橋梁は従来型箱桁

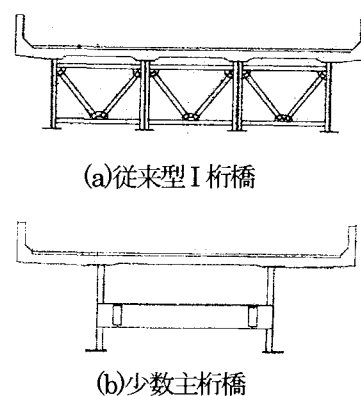


図-4 I 桁橋の従来型橋梁と合理化橋梁

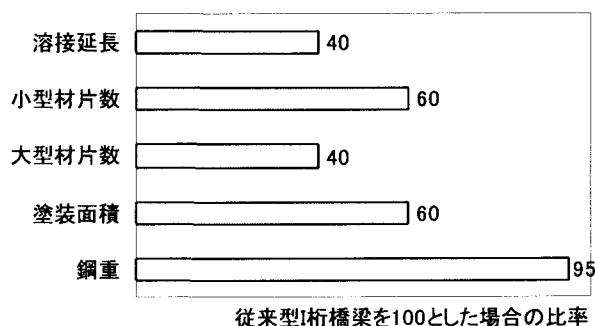


図-5 従来型 I 桁橋梁と少数主桁橋梁の比較

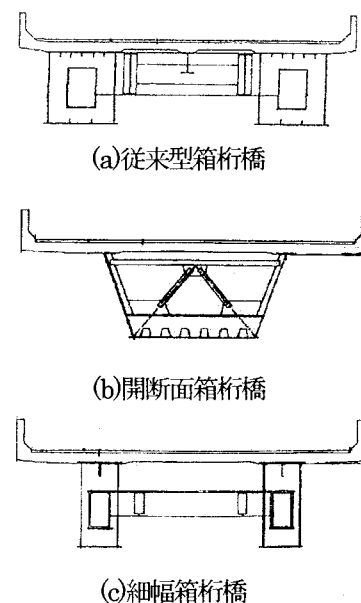


図-6 箱桁橋の従来型橋梁と合理化橋梁

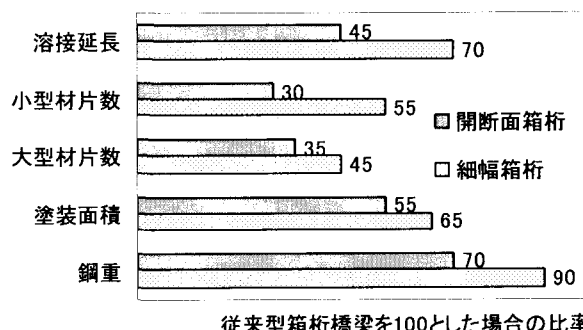
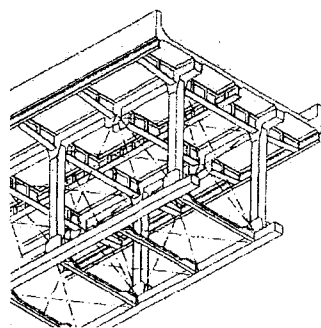
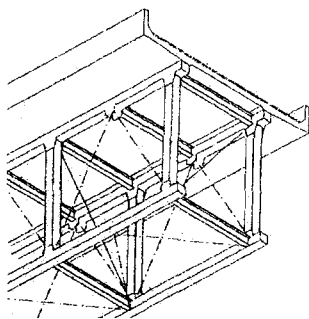


図-7 従来型箱桁橋梁と合理化箱桁橋梁の比較



(a)従来型トラス橋



(b)合理化トラス橋

図-8 トラス橋の従来型橋梁と合理化橋梁

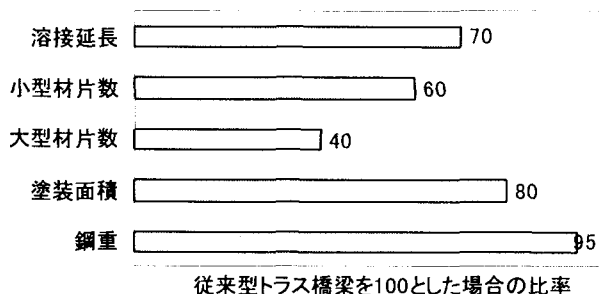


図-9 従来型トラス橋梁と合理化トラス橋梁の比較

橋梁と比べ溶接延長、小型材片数、大型材片数、塗装面積及び鋼重が削減されており、維持管理費の低減が図られている。

また、標準的な支間長は、従来型の連続非合成箱桁橋梁においては40～80mであるのに対し、開断面箱桁橋梁は50～90m、細幅箱桁橋梁は60～100mとなっている。

(3) 合理化トラス橋梁

合理化トラス橋梁は、図-8(b)に示すように従来床版を支持していた縦桁やブラケットなどの床組構造を、PC床版を用いて支持桁間隔を広くすることにより、省略または簡素化している。さらに、横荷重を床版で抵抗させることにより、上横構を省略し、また材片数や溶接延長を極力減らす合理化構造を採用している。

鋼重等の比較を図-9に示す。図-9より、他の形式に

表-2 I桁橋の評価条件

	従来I桁	少数主桁
形式	鋼連続非合成I桁橋	
橋長	90～180m	
幅員	10.5m	
支間長	30～60m	
床版	RC	プレキャストPC
主桁	4本	2本

表-3 箱桁橋の評価条件

	従来箱桁	開断面	細幅
形式	鋼連続合成箱桁橋		
橋長	150～240m	180～240m	
幅員	10.5m		
支間長	50～80m	60～240m	
床版	RC	合成床版	

表-4 トラス橋の評価条件

	従来トラス	合理化トラス
形式	鋼連続非合成トラス橋	
橋長	180～300m	240～300m
幅員	10.5m	
支間長	60～100m	80～100m
床版	RC	プレキャストPC

における合理化橋梁と同様に、合理化トラス橋梁は従来型トラス橋梁と比べ溶接延長、小型材片数、大型材片数、塗装面積及び鋼重が削減されている。

また、標準的な支間長は、従来型の連続非合成トラス橋梁においては60～110mであるのに対し、合理化トラス橋梁は80～150mである。

なお、上弦材を省略もしくは簡素化し、PC床版に上弦材としての構造機能をもたせる合理化トラス橋梁についても現在検討されている。

4. 評価条件の設定

表-2～表-4に各対象橋梁の評価条件を示す。これらは、日本橋梁建設協会²⁷⁾によって示されている構造形式を参考とし、これらの構造の断面形状すべてを、有効幅員10.5m(総幅員11.5m)、3スパン連続鋼非合成と統一したものである。これらの条件の下、各形式の支間長を10m毎に変化させ、LCC及びLCCO₂を試算する。本研究におけるLCC(C_T)及びLCCO₂(E_T)は以下の式を用いて求める。なお、環境負荷は二酸化炭素換算量として試算する。

$$C_T = C_C + C_M + C_R \cdots \cdots (1)$$

$$E_T = E_C + E_M + E_R \cdots \cdots (2)$$

ここで添え字のTはライフサイクル全体、Cは建設段階、Mは維持管理段階、Rは廃棄段階を示している。これらの総和がライフサイクル全体のコスト及び環境負荷、すなわちLCCとLCCO₂となる。なお、地震リスク等のイベントリスクは、ユーザーコストを考えず、構造物のみを考えた場合、その影響は小さい²⁸⁾ので、ここでは扱わないものと

した。また、LCA における割引率は文献 10)で既に検討されており、ここでは0%を用いて試算することとした。

4.1 初期建設段階における条件設定

第一ステップである初期建設段階では、対象橋梁の上部工を建設するにあたり、以下の項目についてのコスト及び環境負荷を試算する。

- 1) 主桁（鋼材・塗装）
- 2) 支承
- 3) 床版（コンクリート・鉄筋・型枠）
- 4) 舗装
- 5) 伸縮装置

橋梁架設工法はトラッククレーン工法とし、各部材の建設機械稼働時間等は、工事の積算資料等を参考とし設定した²⁹⁾。なお、初期建設段階におけるコスト及び環境負荷の算出方法は以下の通りである。

$$E_C = E_{Cm} + E_{Cw} \dots \dots \dots (3)$$

資材の環境負荷

$$E_{Cm} = M_n \times U_{co_2} \dots \dots \dots (4)$$

建設機械の環境負荷

$$E_{Cw} = G \times U_g \times W_h \dots \dots \dots (5)$$

$$C_C = C_{Cm} + C_{Cw} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

- E_C, C_C = 建設段階の環境負荷及びコスト、
- E_{Cm}, C_{Cm} = 資材による環境負荷及びコスト、
- E_{Cw}, C_{Cw} = 建設機械による環境負荷及びコスト、
- M_n = 資材の数量、
- U_{co_2} = 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 ㍓の CO₂ 原単位、
- W_h = 建設機械の稼働時間。

ただし、コストについては日本橋梁建設協会における施工実績に基づいたデータ³⁰⁾を用いることとした。

4.2 維持管理段階における条件設定

第二ステップである維持管理段階では、各部材の部材更新期間を設定し、橋梁の供用期間内は一定の部材更新期間を用いて交換し続けるという仮定の下で試算を行う。また、橋梁の架設された場所の環境条件や交通量などの供用のされ方により各部材の更新期間は異なるため、今回は架設された場所が山間部の場合と都市部の場合を考慮した。表一5に設定した I 桁橋における各部材の更新期間を示す。これらの値は日本橋梁建設協会において実際に実験を行い、そこから検討されたものである。例えば PC 床版では RC 床版との比較実験として輪荷重走行試験を実施し、PC 床版は RC 床版の倍以上の耐久性があるという結果を獲て

表一5 I 桁橋における部材更新期間の設定³⁰⁾

		従来 I 桁橋梁		少数主桁橋梁	
		山間部	都市部	山間部	都市部
床版	更新	50 年		100 年	
	補修	上面増厚工法		間詰コンクリート取替	
		25 年		50 年	
塗装		長油性フタル酸樹脂		薄膜型重防食	
		15 年	10 年	40 年	30 年
支承		鋼製支承 30 年		ゴム支承 100 年	
伸縮装置		フィンガージョイント 30 年			
舗装		普通アスファルト舗装		高機能舗装	
		15 年	10 年	20 年	15 年

いるため、更新期間も倍近くとなっている²⁷⁾。合理化橋梁の部材更新期間は、まだ推定するには実績が浅いため、実験等によって裏付けられた設計供用期間を用いる³⁰⁾。表一5において示した通り、従来型橋梁は RC 床版を採用しているため床版の更新期間を 50 年としている。一方、合理化橋梁に採用されている PC 床版は更新期間が 100 年であるため、今回設定した設計供用期間中には床版の更新はない。床版更新の影響を無くすために従来型橋梁に PC 床版を採用するという考え方もあるが、従来型橋梁は主桁間隔が狭いので PC 床版は不適であり、実際にそのような実績もない。よって、従来型橋梁では、従来通り RC 床版を採用することとした。

なお、床版の補修に関して、RC 床版においては上面増厚工法³⁰⁾が最も一般的な方法と考え、これを採用した。PC 床版においては、間詰コンクリートの取替えによる補修のみを行うこととした。

維持管理段階におけるコスト及び環境負荷の算出方法は以下の通りである。

$$E_M = \sum_{i=1}^5 (E_{iMm} + E_{iMw}) \frac{L}{L_i} \dots \dots \dots (7)$$

$$C_M = \sum_{i=1}^5 (C_{iMm} + C_{iMw}) \frac{L}{L_i} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

- E_M, C_M = 維持管理段階の環境負荷及びコスト、
- E_{iMm}, C_{iMm} = 資材による環境負荷及びコスト、
- E_{iMw}, C_{iMw} = 建設機械による環境負荷及びコスト、
- L = 橋梁設計供用期間、
- L_i = 各部材の更新期間。

4.3 廃棄段階における条件設定

第三ステップである廃棄段階では、対象橋梁上部工の解体におけるコスト及び環境負荷を試算する。以下に一般的な廃棄・架替え段階におけるコスト及び環境負荷の算出方法を示す。

$$E_R = E_{Rw} + E_C \dots \dots \dots (9)$$

$$C_R = C_d + C_C \dots \dots \dots (10)$$

ここで、

- E_R C_R = 廃棄・架替えにかかるコスト、
- E_{Rw} = 廃棄時に用いる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_d = 旧橋撤去費用、
- C_C = 架替えにかかるコスト。

本研究では建設から廃棄までを一サイクルと考え、次に架けられる新橋の建設は、次のサイクルとしているため、式(9)、(10)の右辺第二項はここでは考慮しない。

5. 試算結果及び考察

以下に LCC 及び LCCO₂ の試算結果及び考察を示す。ここで示す値は、比較できるように橋面積で除すことによりすべて無次元化している。

5.1 I 桁橋の LCC 及び LCCO₂

図-10 に I 桁橋の支間長と経年を変化させた時の LCC 及び LCCO₂ の試算結果を示す。横軸の一つである経年とは建設からの年数である。縦軸は基準とする橋梁条件(支間長)を設定し、その橋梁の初期建設段階におけるコスト

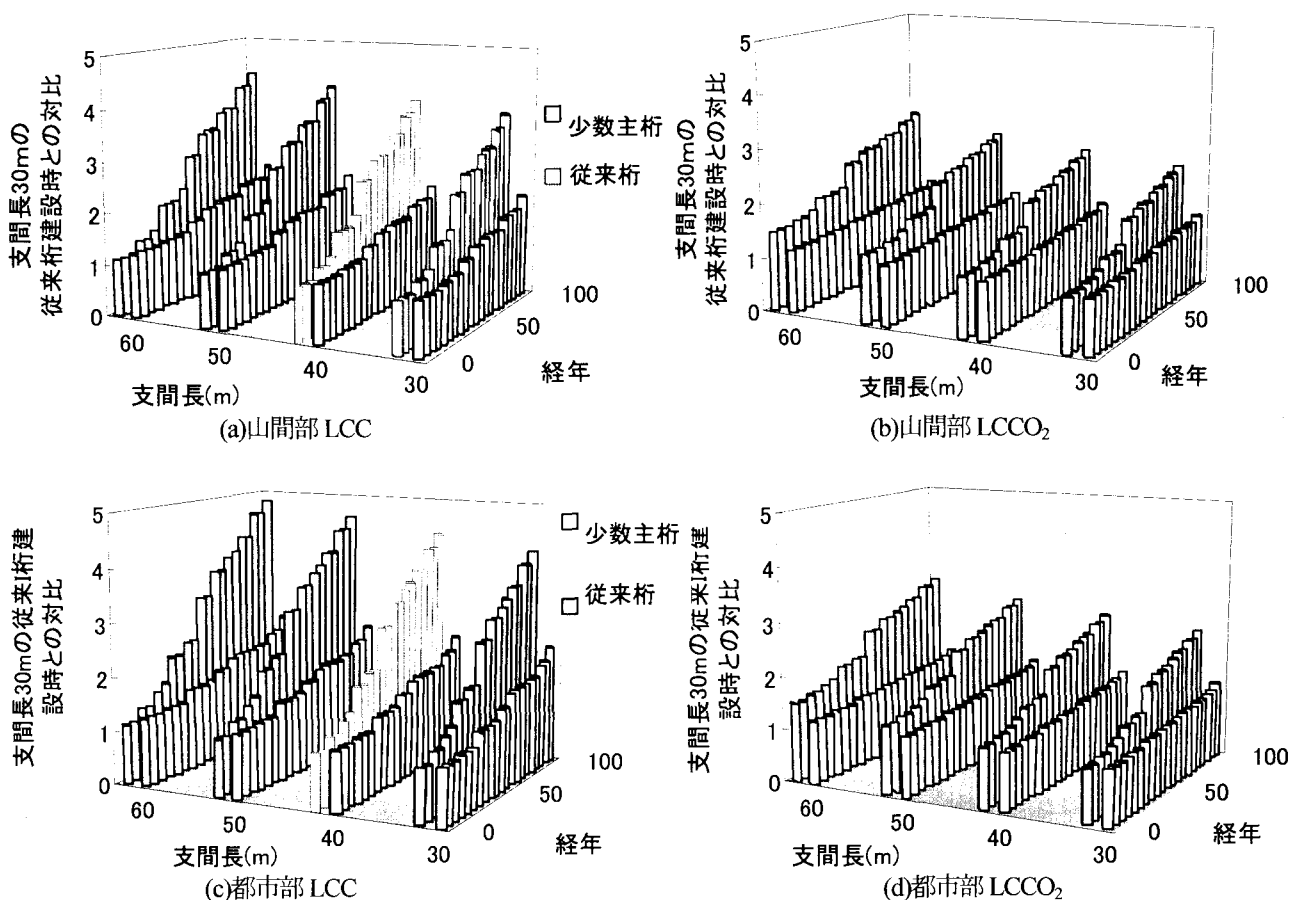


図-10 I 桁橋の LCC 及び LCCO₂

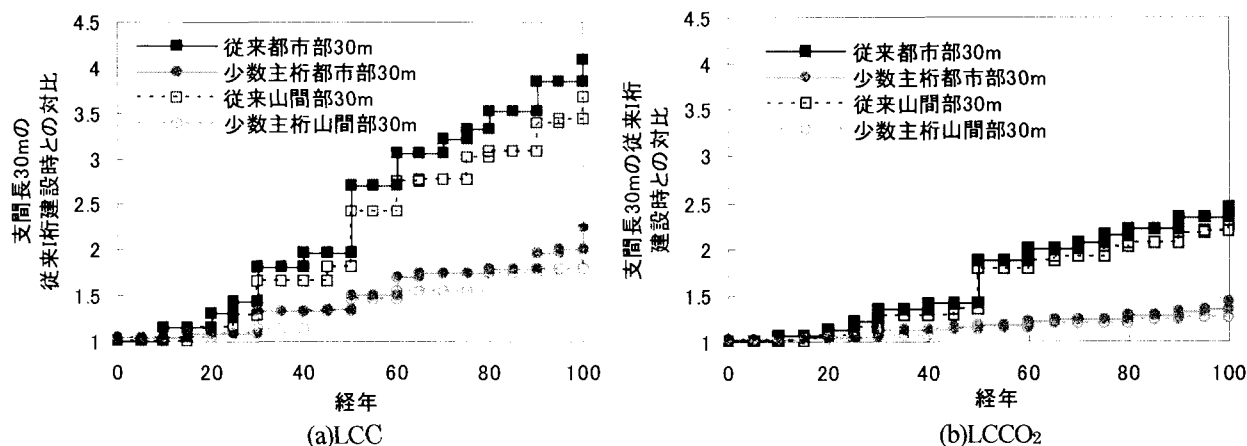


図-11 I 桁橋における LCC 及び LCCO₂ の経時変化

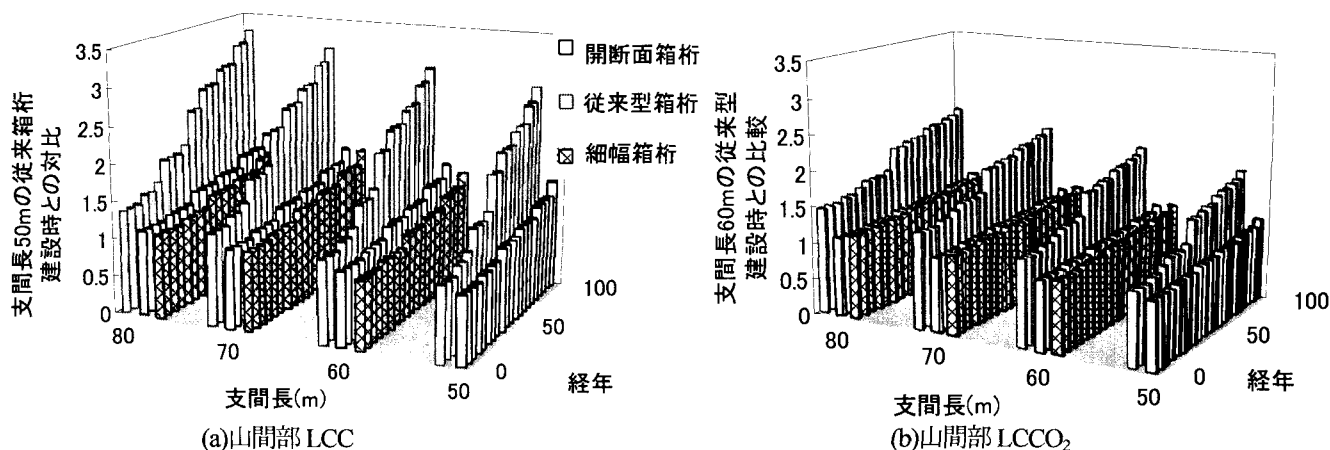


図-12 箱桁橋の LCC 及び LCCO₂

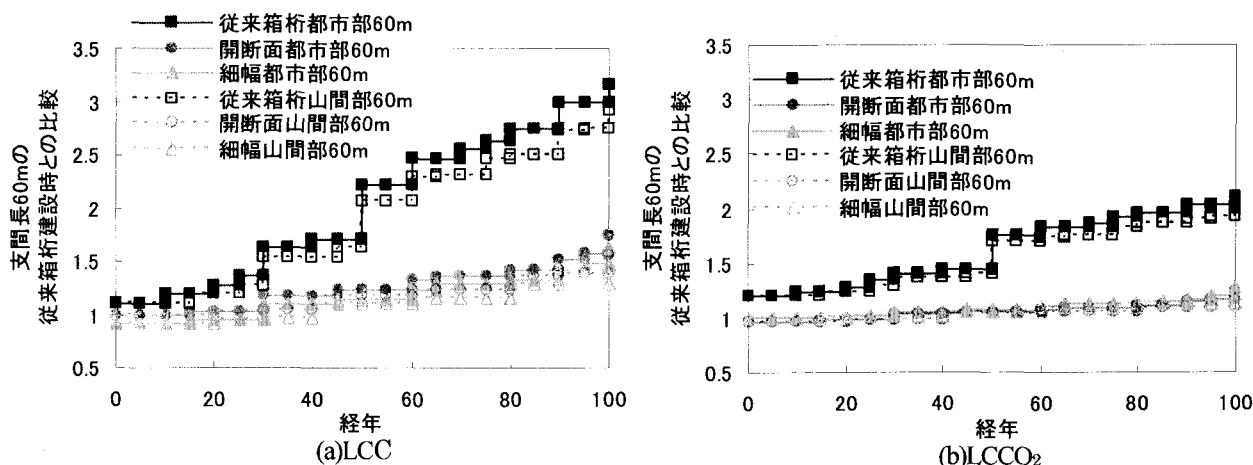


図-13 箱桁橋における LCC 及び LCCO₂ の経時変化

及び環境負荷を 1 とした値である。I 桁橋では支間長 30m を基準としている。

図-10 より、山間部及び都市部ともに、初期建設段階では両橋梁のコストと環境負荷は同程度であるが、LCC 及び LCCO₂ は少数主桁橋梁が従来型橋梁と比べて低減されていることが分かる。この傾向を詳しく検討するために、支間長 30m に注目した試算結果の経時変化を図-11 に示す。図-11 は、山間部と都市部の試算結果を LCC と LCCO₂ に分けてまとめている。

LCC に着目すると、100 年経過した時点におけるコストは少数主桁橋梁が従来型橋梁より約 45% 低減される結果となり、大幅なコスト削減が示された。LCCO₂ も LCC 同様に 100 年経過した時点における環境負荷は少数主桁橋梁が従来型橋梁より約 45% 低減される結果となり、低環境負荷であることが示された。

これらの要因としては、従来型橋梁は RC 床版を用いているために、床版の補修・取替えの負担があり、特に取替えのコスト及び環境負荷が大きいために最も大きな影響を与えていると考えられる。この傾向は、50 年目においてコスト及び環境負荷が急増することから分かる。

山間部と都市部を比較すると、LCC と LCCO₂ のどちらにおいても建設から 100 年経過すると都市部が山間部の約 1.1 倍と若干大きくなることが分かった。この傾向は従来型 I 桁橋梁と少数主桁橋梁の両タイプにおいても見られた。

これは先に表-5 において I 桁橋の維持管理における各部材の更新期間設定例を示した通り、都市部における塗装と舗装の更新期間が短く設定されていることにより維持管理段階のコスト及び環境負荷が大きくなることに起因する。

5.2 箱桁橋の LCC 及び LCCO₂

図-12 に箱桁橋の山間部における支間長と経年を変化させたときの LCC 及び LCCO₂ 試算結果を示す。縦軸は支間長 50m を基準としている。

図-12 より、箱桁橋は I 桁橋と同様に初期建設段階では合理化橋梁のコストと環境負荷は若干小さい程度であるが、LCC 及び LCCO₂ は合理化橋梁が従来型橋梁と比べて低減されていることが分かる。また、開断面箱桁橋梁と細幅箱桁橋梁の LCC 及び LCCO₂ に大きな差は生じないことも分かる。

図-12 における支間長 60m に注目した試算結果の経時変化を図-13 に示す。

LCC は開断面箱桁と細幅箱桁は 100 年経過するとコストは従来型橋梁より山間部では約 50%、都市部では約 45% 低減される結果となった。LCCO₂ も LCC と同様の結果が得られ、経年 100 年で合理化橋梁は従来型橋梁より約 40% 低減された。

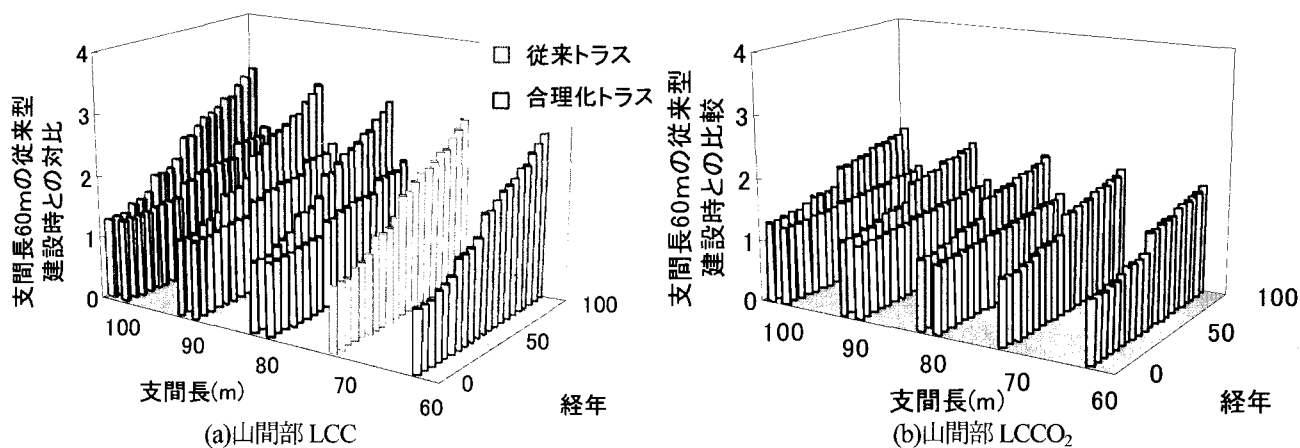


図-14 トラス橋のLCC及びLCCO₂

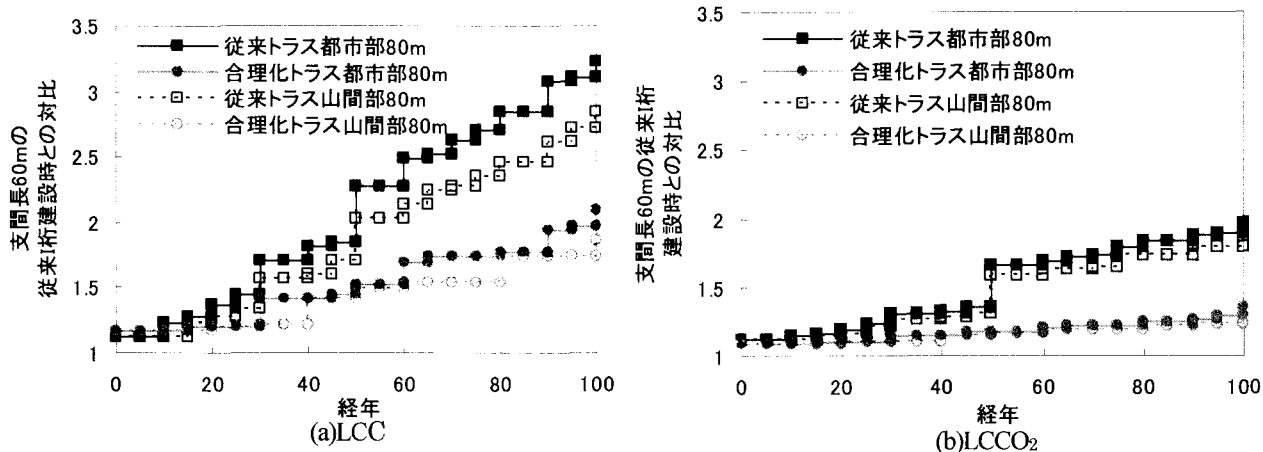


図-15 トラス橋におけるLCC及びLCCO₂の経時変化

箱桁橋の場合もI桁橋と同様に、合理化橋梁におけるコストの大幅な低減の根拠は、従来型橋梁ではRC床版を採用していること、この補修・取替えが大きく影響していることである。

山間部と都市部を比較すると、LCCとLCCO₂のどちらにおいても建設から100年経過すると、従来型橋梁では都市部が山間部の約1.1倍と若干大きくなるが、合理化橋梁はほぼ同値となった。箱桁橋の合理化橋梁である開断面箱桁橋梁と細幅箱桁橋梁では合成床版を採用しており、これは今回設定した供用期間中に補修を要しない。よって、その分だけ従来型橋梁より維持管理段階におけるコスト及び環境負荷の絶対値が小さくなっている。山間部と都市部では維持管理段階において差が生じるため、この絶対値が小さい合理化橋梁では両者に大きな差は生じなかったと言える。

5.3 トラス橋のLCC及びLCCO₂

図-14にトラス橋の山間部における支間長と経年を変化させたときのLCC及びLCCO₂試算結果を示す。縦軸は支間長60mを基準としている。

図-14より、トラス橋は他の橋梁形式と同様に初期建設段階では両橋梁のコスト及び環境負荷は同程度であるが、LCC及びLCCO₂は合理化トラス橋梁の従来型トラス橋梁と比べて低減されていることが分かる。

図-14における支間長80mに注目した試算結果の経時変化を図-15に示す。

LCCは100年経過するとコストは従来型橋梁より山間部では約35%、都市部では約40%低減される結果となった。LCCO₂もLCCと同様の結果が得られ、経年100年で合理化橋梁は従来型橋梁より約30%低減された。

トラス橋においても従来型橋梁におけるRC床版の採用がコスト及び環境負荷の低減に大きく影響している。しかし、I桁橋や箱桁橋と比べて合理化橋梁の低減率が若干低めなのは、採用している舗装の種類が従来型橋梁と合理化橋梁で同じであるため、維持管理段階における舗装のコスト及び環境負荷に差が生じないことが原因として考えられる。

山間部と都市部の比較ではI桁橋と同様に、従来型橋梁、合理化橋梁ともに、建設から100年経過すると都市部が山間部の約1.1倍となることが分かった。これもI桁橋と同様に維持管理段階におけるコスト及び環境負荷の差に起因している。

5.4 維持管理段階における考察

図-11、図-13及び図-15における経年100年目に着目し、ライフサイクルにおける各段階のコスト及び環境負荷の割合とそのうちの維持管理段階における各要素の割合について考察する。ここでは例としてトラス橋を山間部

に建設した場合の結果のみを示す。

図-16 は、トラス橋における従来型橋梁の LCC と LCCO₂ を基準とした初期建設段階、維持管理段階及び廃棄段階の占める割合を示している。従来型橋梁の LCC では維持管理段階、合理化橋梁では初期建設段階の割合が全体の 50%以上を占めていることが分かる。従来型橋梁と合理化橋梁の初期建設段階及び廃棄段階におけるコストに大きな差は生じないため、合理化橋梁の維持管理費が大幅に低減されたと言える。

一方、LCCO₂ では従来型橋梁及び合理化橋梁ともに初期建設段階の占める割合が高く、特に合理化橋梁では 80%以上を占めることが分かる。

図-17 は図-16 における維持管理段階に注目し、その内訳を示した図である。縦軸は従来型橋梁における維持管理段階を基準としている。従来型橋梁の LCC は床版取替え、支承及び塗装におけるコストの合計が全体の約 80%程度と大きく影響していることが分かる。ここで着目すべき点は、5.1 において影響が大きいとした床版取替えはライフサイクル全体では支承の占める割合と同程度となることである。LCCO₂ では、床版取替えが全体の約 40%と最も大きくなる。この理由としては塗装と支承は維持管理によるコストの大きさの割に環境負荷が小さいことが挙げ

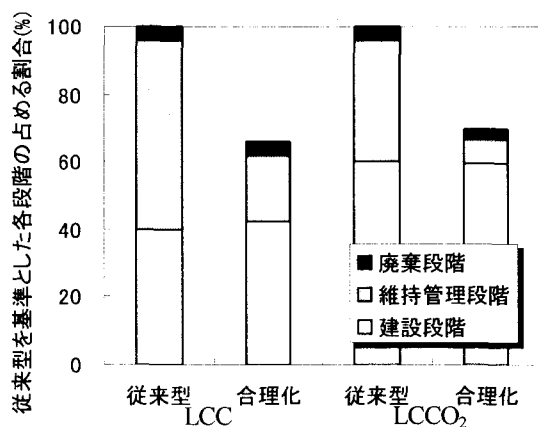


図-16 トラス橋のライフサイクルにおける各段階の割合

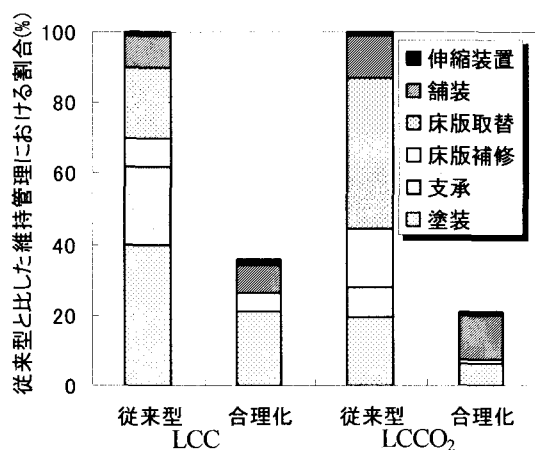


図-17 トラス橋の維持管理段階における各メンテナンス要素の割合

られる。

次に、合理化橋梁に着目すると、舗装と塗装によるコスト及び環境負荷の和がその 90%近くを占めているが、トータルコスト及び環境負荷の絶対量が従来型橋梁の塗装の占める割合程度であるため、結果としてはコスト及び環境負荷は低減されていると言える。以上から、維持管理段階においては床版取替えのみならず、更新期間が短くても総合的な負荷が大きくなる塗装や舗装等による影響も大きくなることが分かり、これらを低コスト、低環境負荷にする対策が重要であることが分かった。

5.5 支間長毎の比較

図-18 は、横軸に支間長をとり、経年 100 年目に着目した LCC 及び LCCO₂ を支間長ごとに比較した図である。これらの値も橋面積で割ることにより無次元化している。また、橋梁形式の違いによる比較をしやすいように 1 つの図

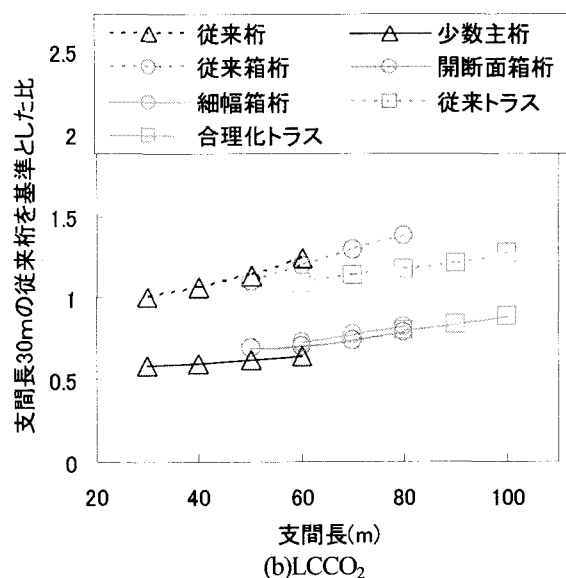
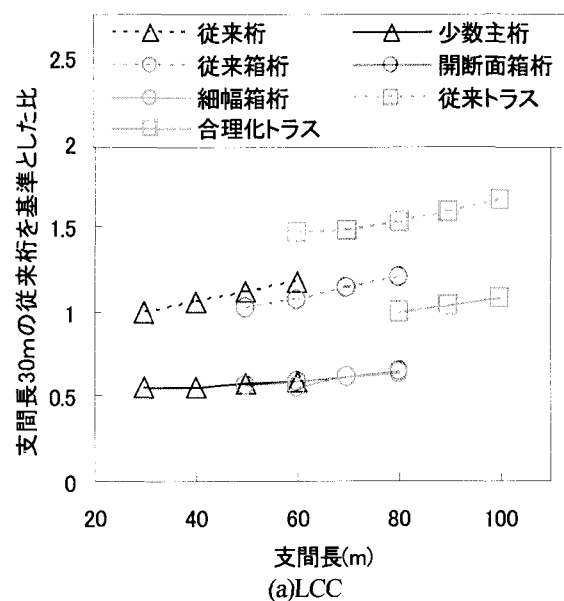


図-18 都市部における支間長毎の比較

表－6 支間長に対する近似曲線の傾き

	LCC	LCCO ₂
従来 I 桁	1.00	1.00
少数主桁	0.22	0.22
従来箱桁	1.02	1.13
開断面箱桁	0.47	0.40
細幅箱桁	0.67	0.60
従来トラス	0.83	0.51
合理化トラス	0.75	0.51

にまとめた。縦軸は図－11 などと異なり、支間長 30m の従来型 I 桁橋における経年 100 年時のコスト及び環境負荷を 1 とした値を示している。立地環境条件の違いによる特徴的な差はほとんど見られなかったため、ここでは都市部における結果を示す。

全体に共通して得られる結果は、当然のことではあるが支間長が長くなるにつれ LCC 及び LCCO₂ も増加することである。これは単位橋面積当たりの鋼重及び塗装面積は支間長と線形的な変化をしないことに起因している。

表－6 に図－18 に示す各橋梁形式の支間長に対する 100 年目の LCC と LCCO₂ の関係を一次線形に近似したときの傾きを示す。これは従来型 I 桁橋の傾きを 1.00 とした値である。

まず、LCC を橋梁形式別に比較すると、従来型橋梁の I 桁橋、箱桁橋及びトラス橋の傾きはそれぞれ、1.00、1.02、0.83 とほぼ同値であることが分かる。次に従来型橋梁と合理化橋梁を比較すると、I 桁橋と箱桁橋における従来型橋梁の変化率は 1.00、1.02 であるのに対し、それらの合理化橋梁における変化率は 0.22、0.47、0.67 と緩やかであることが分かる。これらの結果は、3.3 において示したように、従来型橋梁に対する合理化橋梁の鋼重等の割合が削減されている結果が表れていると考えられる。

一方、トラス橋における従来型橋梁と合理化橋梁の変化率は、0.83、0.75 と大きな差は生じていない。合理化トラスの LCC は低減されるものの、それらの支間長毎の変化において他の形式のような特徴は見られない。LCCO₂ においても LCC 同様の結果が得られる。ただし、トラス橋における変化率が従来型橋梁、合理化橋梁ともに 0.51 と LCC におけるそれより緩やかとなっている。これより、トラス橋は他の橋梁形式と比べて支間長の変化によるコスト及び環境負荷の変化率が小さいという特徴が得られた。

6. 結論

本研究において、I 桁橋、箱桁橋及びトラス橋における従来型橋梁と合理化橋梁についてライフサイクルにおけるコスト及び環境負荷についての比較検討を行った。その結果、以下のような主な結論が得られた。

- 1) 橋梁を山間部に建設した場合と都市部に建設した場合のライフサイクルコスト及びライフサイクル環境負荷

は、都市部の方がどの橋梁形式においても約 1.1 倍大きめとなることを示した。

- 2) I 桁橋における 100 年を供用期間と仮定したライフサイクルコスト及びライフサイクル環境負荷は、100 年経過した時点で少数主桁橋梁が従来型 I 桁橋梁より約 45% 低減されることを示した。また、この理由として従来型 I 桁橋梁は RC 床版の補修・取替えのコスト及び環境負荷の影響が大きいことを示した。
- 3) 箱桁橋とトラス橋におけるライフサイクルコスト及びライフサイクル環境負荷も、I 桁橋と同様に 100 年経過すると合理化橋梁は従来型橋梁より箱桁橋では 40～50%、トラス橋では 30～40% 低減されることを示した。
- 4) 各形式の合理化橋梁は維持管理段階において大幅にライフサイクルコスト及びライフサイクル環境負荷が低減されることを明らかにした。
- 5) 維持管理段階におけるコスト及び環境負荷は床版取替えのみならず、更新期間が短くても総合的な負荷が大きくなる塗装や舗装等による影響も大きくなり、これらを低コスト、低環境負荷にする対策が重要であることを示した。
- 6) 従来型橋梁、合理化橋梁ともに、どの橋梁形式においても支間長が増大することにより単位橋面積当たりのライフサイクルコスト及びライフサイクル環境負荷が増加することを定量的に示した。また、トラス橋におけるその傾きは他の橋梁形式と比して緩やかであることを定量的に明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、資料提供等にご協力くださった、横河ブリッジの尾下里治氏に深く感謝致します。なお、本研究の一部は、平成 14、15、16 年度文部科学省科学研究費補助金・基礎研究(B)(2)(研究代表者：伊藤義人、課題番号：1560237)として研究補助を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田辺敏明、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) 松岡譲、森田恒幸、水野健太：エネルギー消費技術の改善が二酸化炭素排出量制御に及ぼす影響のシミュレーション、土木学会論文集、No.573/VII-4, pp.81-92, 1997。
- 3) 松岡譲、森田恒幸、甲斐沼美紀子、水野健太：わが国における二酸化炭素排出量の見通しとその抑制対策の効果について、土木学会論文集、No.580/VII-5, pp.27-36, 1997。
- 4) 盛岡通：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例、第 4 回地球環境シンポジウム講演集、土木学会、pp.29-34, 1996。
- 5) 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 1)、建設省土木研究所材料施工部科学研究室、1993。
- 6) 伊藤義人、平野徹、永田裕規、ハンマード アミン、

- 西土隆幸, 加島章: 環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援システムの作成と利用に関する研究, 土木学会論文誌, No.553/VI-33, pp.187-199, 1996.
- 7) 加藤博和, 林良嗣, 登秀樹: 道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル的評価手法, 環境システム研究論文誌, Vol.24, pp.282-293, 1996.
 - 8) Horvath, A. and Hendrickson, C.: Steel versus steel-reinforced concrete bridges: Environmental assessment, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 4(3), pp.111-117, 1998.
 - 9) 伊藤義人, 永田裕規, スヌワル ラスクマン, 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, 構造工学論文誌, Vol.45A, 1295-1305, 1999.
 - 10) 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, 構造工学論文誌, Vol.46A, 1261-1272, 2000.
 - 11) 伊藤義人, 梅田健貴, 岩田厚司: 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, 構造工学論文誌, Vol.47A, 1109-1118, 2001.3.
 - 12) Itoh, Y., Sunuwar, L., Hirano, T., Hammad, A. and Nishido, T.: Bridge type selection system incorporating environmental impact, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.6, pp.81-101, 2000.
 - 13) Itoh, Y., Liu, C., Nagata, H., Umeda K. and Nishikawa, K.: Lifecycle environmental impact and cost of bridges, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.7, pp.151-168, 2001.
 - 14) Itoh, Y., Liu, C., Umeda, K. and Nishikawa, K.: Lifecycle assessment application for bridge technology development, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.7, pp.169-186, 2001.
 - 15) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2000.
 - 16) 土木学会: 土木建設業における環境負荷評価検討部会 H7 報告書, 1996.
 - 17) 社団法人 鋼材倶楽部: 橋梁の環境負荷評価試算例 社会資本整備とエコマテリアルに関する調査研究報告書, 1999.
 - 18) 土木学会: 建設コンサルタントと地球環境問題に関する研究, 1998.
 - 19) 岡野行秀: 荒廃するアメリカ, 開発問題研究所, 1984.
 - 20) 財団法人 高速道路技術センター: 第二東海自動車道 横浜東海線鋼少数主桁橋梁の設計施工に関する調査研究報告書, 1995.
 - 21) 財団法人 高速道路技術センター: 第二東海自動車道 横浜東海線鋼少数主桁橋梁の設計施工に関する調査研究資料編, 1995.
 - 22) 社団法人 日本鋼構造協会: 合理化桁に関するデザインマニュアル, 2000.
 - 23) 財団法人 高速道路技術センター: 鋼箱桁橋の合理的な設計・施工に関する技術検討報告書, 1999.
 - 24) 財団法人 高速道路技術センター: 鋼箱桁橋の合理的な設計・施工に関する技術検討報告書, 2000.
 - 25) 財団法人 高速道路技術センター: 鋼箱桁橋の合理的な設計・施工に関する技術検討報告書, 2001.
 - 26) 財団法人 高速道路技術センター: 東海北陸自動車道 鋼トラス橋の合理化橋梁に関する調査研究報告書, 2000.
 - 27) 社団法人 日本橋梁建設協会: 新しい鋼橋の誕生, 2003.
 - 28) 伊藤義人, 和田光永: イベントを考慮した交通基盤施設のライフサイクル評価手法に関する研究, 土木学会論文誌, No.745/I-65, pp.131-142, 2003.
 - 29) 財団法人 経済調査会: 積算資料, 2001.
 - 30) 社団法人 日本橋梁建設協会: 鋼橋のライフサイクルコスト, 2003.
 - 31) 財団法人 高速道路調査委員会: 上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.

(2004年9月17日受付)