

塗装に着目した鋼橋のライフサイクルアナリシス

Lifecycle analysis of the steel bridges considering painting

坪内佐織*, 伊藤義人**, 金 仁泰***, 守屋進****

Saori TSUBOUCHI, Yoshito ITOH, In-Tae KIM, Susumu MORIYA

*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)

****工修, 独立行政法人土木研究所, 材料地盤研究グループ(新材料) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

Steel bridges are usually prevented from corrosion by painting. Repainting is required several times during service life of bridges, so that the maintenance of painting has great influence of the lifecycle cost (LCC) and lifecycle environmental impact. In the paint industry, cutting down the volatile organic compound (VOC) in paint is required to reduce the environmental impact. The lifecycle analysis (LCA) of steel bridge painting in this study considers not only lifecycle CO₂ emission (LCCO₂) but also lifecycle VOC emission (LCVOC) for rationalized bridges. The LCA of the conventional bridges, I-girder and truss bridges, were also performed and compared with those of the newly developed bridges. The characteristics of LCC, LCVOC and LCCO₂ of these bridges were found from the analysis. The effectiveness of advanced paints reducing VOC was discussed.

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

キーワード: 揮発性有機化合物, 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

地球環境保全のために, 持続可能な開発をテーマとして国際的に様々な取り組みがなされてきている. 建設分野においても, 構造物のライフサイクルコスト(LCC)のみならず, 近年はライフサイクルを通じた環境負荷も低減させることを目的として技術開発や研究が始められている^{1), 2)}.

構造物の環境負荷は, 日本においては代表的な温室効果ガスである二酸化炭素の排出量を用いて評価する場合が多い. 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³⁾. また, 土木学会地球環境委員会 LCA 小委員会では, 1996 年に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⁾. さらに, 1996 年の伊藤ら⁵⁾の研究では, 地球温暖化問題も考慮できる橋梁形式選定システムを, コスト, 走行性及び景観だけでなく環境負荷も指標に含めて構築している.

鋼構造物の耐久性向上のために防食が行われるが, 鋼橋では一般的に塗装を用いて防食がなされている. 鋼橋の供

用期間中には, 防食機能を維持するために塗装の塗替えが何度か行なわれるため, 維持管理の中における塗装のコストや環境負荷の割合は大きい. そのため, 塗装の維持管理を軽減すれば, ライフサイクルにおけるコストや環境負荷を低減することにつながる.

近年, 鋼橋の維持管理軽減に向けた技術開発が活発に行われている. 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. 合理化橋梁はローメンテナンス化も考慮されており, 塗装に関してはより長寿命の塗装系を用いること, 及び塗装面積を削減することにより維持管理軽減が図られている⁶⁾. 合理化橋梁のライフサイクルコスト(LCC)及び二酸化炭素排出量を指標としたライフサイクル環境負荷(LCCO₂)の定量的な試算の例としては伊藤らの研究が挙げられ^{7)~13)}, 従来型橋梁と比して低コストと低環境負荷を実現していることが明らかにされている.

使用材料に起因する二酸化炭素排出量を指標とした環境負荷を評価する場合, 基本的に評価対象の使用材料の量に各材料の原単位を掛けて二酸化炭素排出量を算出する. よって, 評価対象の使用材料の絶対量が多いほど, 二酸化炭素排出量も多くなる. しかし, 鋼橋塗装の塗料の使用量は, 鋼橋全体の使用材料の絶対量に対して非常に少ないの

で、鋼橋の LCCO_2 における塗装の割合は、比較的少なくなる。伊藤ら⁸⁾によって、従来型橋梁と少数主桁橋梁の LCCO_2 における塗装の割合が非常に低いことが明らかにされている。また、鋼材倶楽部の試算例¹⁴⁾によれば、上部工建設時における塗装の費用は全体の約 11%を占めるが、二酸化炭素排出量はわずか約 2%にすぎない。しかし、塗装における環境負荷は二酸化炭素排出量のみではないことが、最近は良く知られてきている。

2001 年度より化学物質排出把握管理促進法(PRTR 法)に基づく化学物質管理が始まり、これに指定されている化学物質の取扱量の把握と、排出量及び廃棄物としての移動量の届出が行われている。そのため、塗装業界でも、塗料による環境負荷を評価する体制が整備されつつある¹⁵⁾。塗料中には環境や人体に害を及ぼす化学物質や重金属が含まれているため、PRTR 法を契機に有害物質の管理と削減が業界全体の目標となっている。例えば、自動車分野では、塗装時の揮発性有機化合物(VOC)を削減するために、車体への塗着効率上がる設備や、VOC 発生量の少ない水性塗料の設備を導入していく方向にある。また、橋梁分野では、VOC を含んでいる溶剤を低減した低溶剤塗料や無溶剤塗料の耐久性や作業性などを評価し、実用化に向けた研究開発が行われている¹⁶⁾。このように、塗装分野では塗料に含まれている VOC を削減することが大きな課題となっており、すなわちこれが環境負荷の一つとしてとらえる方向にある。

よって、鋼橋塗装のライフサイクルアナリシスを行う場合、環境負荷は二酸化炭素排出量のみならず、有害物質の含有量や排出量も考慮することが今後は必要である。橋梁の建設段階の塗装における有害物質も考慮して環境負荷評価を行った例としては Horvath ら¹⁷⁾の研究が挙げられるが、橋梁のライフサイクルを通した検討はまだ十分に行われていない。そこで本研究では、鋼橋の塗装に着目して、鋼橋のライフサイクルを通して発生する有害物質及び二酸化炭素の排出量、またコストを定量的に試算し、これらを比較検討することにより、従来型橋梁と合理化橋梁のライフサイクルアナリシスを行う。

2. 塗料に含まれる有害物質

塗料には様々な有害物質が含まれているが、これらは、有害性化学物質、有害性重金属、揮発性有機化合物(VOC)に分類することができる。

有害性化学物質は、身近な例としてホルムアルデヒドが挙げられる。これはシックハウス症候群の主たる原因物質であるため、使用制限が法制化されている¹⁵⁾。

有害性重金属には、主に着色顔料と防錆顔料に含まれている鉛やクロムなどがある。これらは人体などへの有害性が認められ、鉛については労働安全衛生法において鉛中毒予防規制が設けられており、これらの削減が求められている¹⁵⁾。これに関連した最近の研究として、嘉瀬井ら¹⁸⁾の鉛・クロムフリー塗料の耐久性評価が挙げられる。嘉瀬井らは耐久性と同時にコストアップの問題点についても言

及している。

VOC には、主に有機溶剤に含まれているトルエンやキシレン等がある。これらは浮遊粒子状物質(SPM)や光化学オキシダントの原因物質に挙げられ、また健康への害も認められている。VOC に関係する国内の法律は数多くあるが、中でも 2004 年に公布された改正大気汚染防止法では、VOC の排出量を、2000 年度を基準として 2010 年までに 30%削減することを目的としている¹⁹⁾。これに伴い、塗料を水性化することにより使用有機溶剤量を低減させた塗料への変換が進んでいる。

鋼道路橋塗装に用いられる塗料においても、防錆顔料や硬化促進剤に有害性重金属が、溶剤として VOC が含まれている。塗装工事において有害性重金属が環境に影響を及ぼすのは、主に素地調整時と考えられる。よって、有害性重金属の環境負荷をライフサイクル評価する場合、素地調整時にどの程度大気へ飛散するかを試算する必要がある。しかし、現場で素地調整を行う場合、原則として飛散防止の防護シートが用いられるため、防護が完璧に行われると仮定すれば環境負荷はゼロと考えることも可能である。一方、VOC は塗料自体から放出するため、塗料を使用する時点でその排出量を試算する必要がある。

よって本研究では、有害性重金属に関しては防護シートで完全に環境への影響を無くすことができると考え、塗装時に発生する有害物質は VOC のみと仮定した。そして、二酸化炭素排出量に加えてライフサイクルにおける VOC 排出量(LCVO)を環境負荷の指標の一つとして考慮した塗装のライフサイクルアナリシス(LCA)を行うこととした。

3. 本研究における橋梁の LCA

3.1 はじめに

本研究における橋梁のライフサイクルアナリシス(LCA)は、図-1 に示すプロセスに従い行った^{5),8)-13)}。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⁷⁾。

LCA 第一段階ではライフサイクルの分類を行う。本研

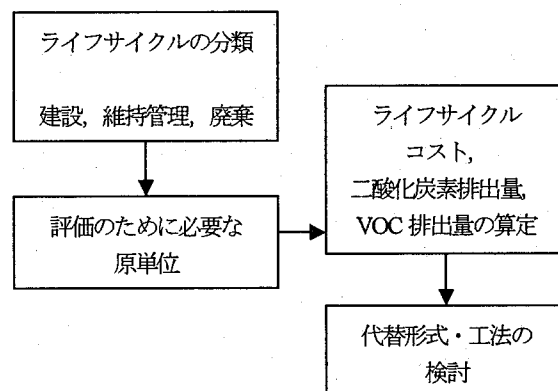


図-1 本研究における LCA 手法

表-1 主な二酸化炭素原単位

	単位	原単位(kgC/単位)
塗装	t	452
足場	t	128
鋼材	t	411
コンクリート	m ³	84.9
アスファルト	t	11.3

表-2 各塗装系の VOC 含有量原単位

	原単位(g/m ²)
A-1 (従来型橋梁の新規塗装)	184.9
a-1 (従来型橋梁の塗替え塗装)	74.8
I (合理化橋梁の新規塗装)	303.3
c-1 (合理化橋梁の塗替え塗装)	285.8

究では、対象とする鋼橋の建設、維持管理、廃棄を1サイクルとし、それを初期建設段階、維持管理段階、廃棄段階に分け、これを解析の範囲と設定する。

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。

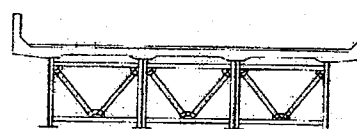
本研究では、二酸化炭素排出量原単位は基本的に土木学会地球環境委員会 LCA 小委員会の推奨値²⁰⁾を用いることとした。同委員会では産業関連分析法と積上法を合体させる方法を提案し、二酸化炭素排出量原単位を提示している。使用した主な原単位を表-1に示す。原単位にそれぞれの使用量(それぞれの単位)を掛けたものが二酸化炭素排出量となる。また、VOC 排出量の原単位としては、表-2を用いた。これは、単位面積あたりに含まれている VOC 量を塗装系ごとに積算し、本研究で求めた値である。詳しくは、3.4を参考にされたい。

LCA 第三段階では、対象とする鋼橋のLCC、LCCO₂及びLCVOCを実際に試算する。

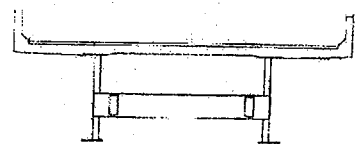
LCA 第四段階では、代替形式・工法の検討を行う。ここでは構造形式や支間長等の違いによるLCC、LCCO₂及びLCVOCを比較検討し、それぞれの特徴について考察する。

3.2 対象橋梁

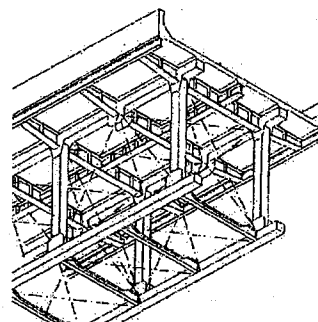
対象とする橋梁は、文献13)で扱ったI桁橋梁とトラス橋梁についての、従来型橋梁と合理化橋梁(少数主桁橋梁、合理化トラス橋梁)の計4種類である。これらの概略図²¹⁾を図-2に、構造設定の詳細を表-3と表-4に示す。少数主桁橋梁は、プレストレスト・コンクリート床版(PC床版)を用いて床版支持間隔を大きくすることにより、主桁本数を少なくし、横桁・横構等の構造部材を単純化または省略して合理化を図っている。合理化トラス橋梁は、床版を支持している縦桁やブラケットなどの床組構造を、PC床版を用いて支持桁間隔を広くすることにより、省略または簡



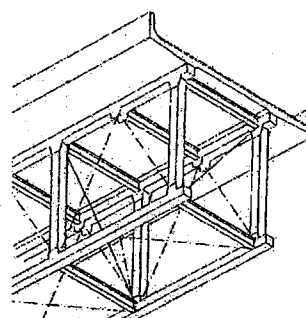
(a)従来型I桁橋梁



(b)少数主桁橋梁



(c)従来型トラス橋梁



(d)合理化トラス橋梁

図-2 対象橋梁

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。これらの構造形式は、比較しやすいようにすべて3スパン連続非合成、有効幅員10.5m(総幅員11.5m)に統一させた。

対象橋梁の鋼重と塗装面積の支間長変化を図-3及び図-4に示す。また、従来型橋梁の鋼重と塗装面積に対する合理化橋梁の低減率を表-5に示す。I桁橋梁の鋼重及び塗装面積は日本橋梁建設協会による実績に基づいた支間長ごとのデータを参考とした⁹⁾。トラス橋梁に関しては、従来型橋梁は過去の実績があるのでI桁橋梁と同様に文献6)の支間長ごとのデータを参考としたが、合理化トラスに関しては、実績が浅いため、同文献に示されている従来型橋梁と比較した低減率を用いて算出した。よって、トラス橋梁では合理化橋梁の鋼重と塗装面積の低減率はどの支間長においても一定となっている。対象とした支間長は、

表-3 I桁橋梁の評価条件

	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-4 トラス橋梁の評価条件

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

表-5 鋼重及び塗装面積の低減率

支間長(m)	鋼重低減率(%)	塗装面積低減率(%)
I桁橋梁 30m	108	59
I桁橋梁 40m	94	49
I桁橋梁 50m	82	41
I桁橋梁 60m	72	35
トラス橋梁 80m	95	80
トラス橋梁 90m	95	80
トラス橋梁 100m	95	80

表-6 塗装条件

	従来型橋梁	合理化橋梁
新規塗装	A-1 (鋼道路橋塗装便覧)	I (薄膜型重防食)
塗替え塗装	a-1 (鋼道路橋塗装便覧)	c-1 (鋼道路橋塗装便覧)
塗替え時の素地調整	2種ケレン	2種ケレン

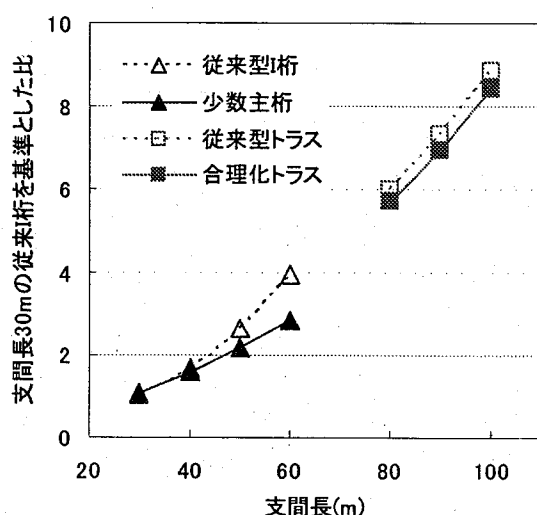


図-3 鋼重の支間長変化

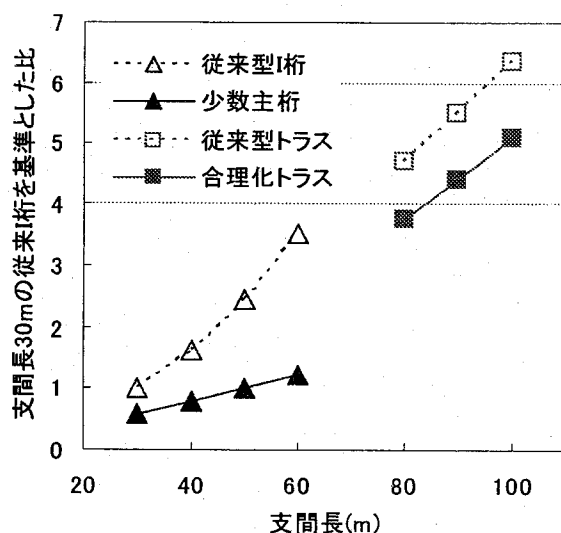


図-4 塗装面積の支間長変化

I桁橋梁で30~60m, トラス橋梁で80~100mの範囲とした。縦軸は、それぞれ従来型I桁橋梁の値を基準とした比

較値を示している。図-3及び図-4から分かるように、従来型I桁橋梁は下に凸の放物線状に変化する。よって、I桁橋梁に関しては支間長の違いにより試算結果に差が出てくる¹³⁾。本研究では支間長をそれぞれの適用支間長範囲において10m毎に変化させ、各々について試算を行った。

3.3 塗装条件

本研究では、実際の橋梁に使われている塗装系を考慮して、従来型橋梁と合理化橋梁とで異なる塗装系を採用している。各々に採用した塗装系を表-6に示す。A-1, a-1, c-1は鋼道路橋塗装便覧²²⁾, Iは日本道路公団²³⁾により規定されている塗装仕様である。従来型橋梁では、日本の鋼橋塗装に最も多く用いられているA塗装系と、その塗替え仕様であるa塗装系を採用した。合理化橋梁ではA塗装系より防食性が高く塗替え周期が長くなるI塗装系と、塗替え塗装仕様としては規定されていないが、日本建設橋梁協会²⁴⁾により提案されている、A, I塗装系よりさらに防食性の高いC塗装系の塗替え仕様であるc塗装系を採用した。

A-1及びa-1の使用塗料及び標準使用量を表-7に、I及びc-1の使用塗料及び標準使用量を表-8に示す。塗装の方法は、工場塗装時はスプレーを、現場塗装時ははけを用いると仮定した。塗替え時の素地調整としては2種ケレンを採用した。実際の塗替え塗装工事では1グレード下がる3種ケレンが多用されるが、これは発錆面積によりさらに3種類に分けられており、言い換えれば、個々の桁における局部的な発錆状態にも対応した素地調整が行われる。本研究におけるLCAでは個々の発錆状態を考慮せず、単純化して、今回は多少オーバーグレードではあるが、局部的な腐食も含めたすべての塗膜を除去する2種ケレンを採用した。

3.4 評価条件

本研究におけるライフサイクルコスト $LCC(C_f)$, ライフ

表-7 A-1 及び a-1 塗装系の詳細

	使用塗料, (加熱残分)	標準使用量(g/m ² /回)		
		A-1	a-1	
プライマー	長ばく形エッチングプライマー, (0.19)	工場	130(スプレー)	—
下塗り	鉛系さび止めペイント, (0.92)		170(スプレー)	140(はけ)
下塗り	鉛系さび止めペイント, (0.92)		170(スプレー)	140(はけ)
中塗り	長油系フタル酸樹脂塗料中塗り, (0.82)	現場	120(はけ)	120(はけ)
上塗り	長油系フタル酸樹脂塗料上塗り, (0.72)		110(はけ)	110(はけ)
合計		700		510

表-8 I 及び c-1 塗装系の詳細

	使用塗料, (加熱残分)	標準使用量(g/㎡/回)			
		I		c-1	
プライマー	機能性プライマー, (0.51)	工場	200(スプレー)	—	—
下塗り	有機ジンクリッチペイント, (0.86)		700(スプレー)	現場	300(はけ)
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗, (0.68)		—		240(はけ)
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料下塗, (0.68)		—		240(はけ)
中塗り	ポリウレタン樹脂塗料中塗, (0.69)		170(スプレー)		140(はけ)
上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗, (0.61)		140(スプレー)		120(はけ)
合計			1210		1040

サイクル二酸化炭素排出量 $LCCO_2(E_T)$ 及びライフサイクル VOC 排出量 $LCVOC(V_T)$ は、文献 8) における仮定を参考として、以下の式を用いて求める。なお、LCC、 $LCCO_2$ 及び $LCVOC$ と、ここでは割引率は 0% としている。割引率に関する議論は文献 8) を参照されたい。

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

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

$$V_T = V_C + V_M + V_R \dots \dots \dots (3)$$

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 、 $LCCO_2$ 及び $LCVOC$ となる。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²⁰⁾に従い、100 年と設定した。

(1) 初期建設段階における条件設定

初期建設段階では、主桁(鋼材・塗装)、支承、床版、舗装、伸縮装置のコスト及び環境負荷を試算する。初期建設段階のコスト及び二酸化炭素排出量は文献 8) を参考として、VOC 排出量 V_C は以下の式を用いて算出する。

$$V_C = \sum_{i=1}^n (P_{Ci} - P_{Ci} \times r_i) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

P_{Ci} = 建設時使用塗料それぞれの標準使用量、

r_i = 各使用塗料の加熱残分、

n = 塗料層数。

式(4)では、塗料使用量から揮発せずに残存する量を差し引くことにより、VOC 排出量 V_C を試算している。例えば、A-1 塗装系のプライマーに用いられる長ばく形エッチングプライマーの VOC 排出量は、表-7 に示している加熱残分と標準使用量を用いて、 $130 - (130 \times 0.19) = 105.3$ (g/m²) と試算した。

表-9 I 桁橋梁における部材更新期間の設定¹⁶⁾

		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 25 年		間詰コンクリート取替 50 年	
塗装(括弧内は塗替え)		A-1 (a-1)		I (c-1)	
		15 年 (15 年)	10 年 (10 年)	30 年 (40 年)	20 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

(2) 維持管理段階における条件設定

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⁸⁾。橋梁の設置環境により更新期間は異なることを考慮し、山間部と都市部に架設された場合を想定して、二種類の更新期間を設定した。表-9 に設定した I 桁橋梁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⁹⁾。

維持管理段階のコスト及び二酸化炭素排出量は、初期建設段階と同様に、文献 8) を参考として求め、VOC 排出量 V_M は以下の式を用いて算出する。

$$V_M = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{mi} \times r_i) \dots \dots \dots (5)$$

$$V_M = V_m \times \frac{L - L_C}{L_m} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

V_m = 1回の塗替え塗装における VOC 排出量,
 P_m = 塗替え時使用塗料それぞれの標準使用量,
 L = 橋梁設計供用期間,
 L_c = 建設時塗装の更新期間,
 L_m = 塗替え塗装の更新期間.

(3) 廃棄段階における条件設定

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。文献 8) を参考として、廃棄段階の C_R は旧橋撤去費用を、 E_R は廃棄時に用いる建設機械による環境負荷を算出する。また、VOC の排出は塗装時のみと仮定して、廃棄段階の VOC 排出量 V_R は 0 とした。

4. 試算結果及び考察

4.1 はじめに

LCC、 $LCCO_2$ 及び LCVOC の試算結果は、支間長ごとの比較ができるように橋面積で除して無次元化する。また、異なる橋梁形式及び設置環境においても比較できるように、支間長を 30m と設定した従来型 I 桁橋梁における初期のコスト、二酸化炭素排出量及び VOC 排出量を基準値、すなわち 1 としたときの値を示す。

4.2 鋼橋全体の LCC 及び $LCCO_2$ における塗装の割合

鋼橋全体の LCC 及び $LCCO_2$ の 100 年経過時の試算結果¹³⁾におけるトラス橋梁の塗装の割合を図-5 に示す。これには、塗装時に用いる足場のコスト及び二酸化炭素排出量も含まれている。これらは、維持管理段階における従来型橋梁の LCC 及び $LCCO_2$ を 100% としたときの割合を示している。まず、従来型橋梁における塗装の割合に注目すると、コストは約 40% となるが二酸化炭素排出量は約 20% となり、従来型橋梁における塗装はコストの割に二酸化炭素排出量への影響は小さいことがわかる。合理化橋梁に関しても同様の知見が得られている。

次に、塗装の占める定量的な割合を I 桁橋梁のそれも合わせて表-10 に示す。この値は、維持管理段階における従来型橋梁、合理化橋梁それぞれの LCC、 $LCCO_2$ を 100% としているため、合理化橋梁における割合が従来型橋梁より大きくても、実際の値は小さい。表-10 から、I 桁橋梁における塗装の占める割合についてもトラス橋と同様の傾向にあること、つまり維持管理段階における塗装の二酸化炭素排出量はコストの割に小さいことがわかる。

この理由としては、塗装は他のメンテナンス要素と比して使用材料の絶対量が少ないことが考えられる。二酸化炭素排出量は使用量と原単位の積で試算するため、使用量が少ないと二酸化炭素排出量も少なくなるからである。

以上から、鋼橋の LCC 及び $LCCO_2$ と比べて、塗装の $LCCO_2$ の占める割合は、塗装の LCC の占める割合に比べて小さいことがわかる。

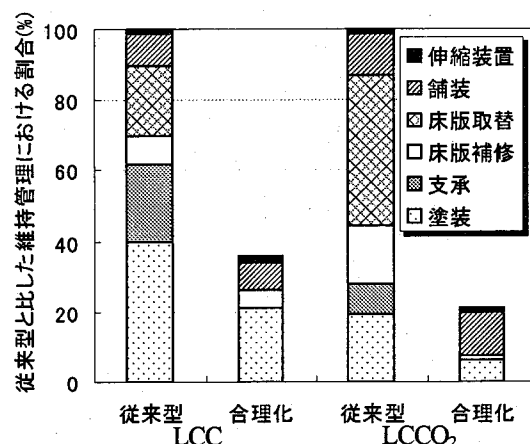


図-5 トラス橋の維持管理段階における各メンテナンス要素の割合

表-10 LCC 及び $LCCO_2$ における塗装の割合(%)

	LCC		$LCCO_2$	
	従来型	合理化	従来型	合理化
I 桁橋梁	34.7	39.4	16.0	27.5
トラス橋梁	39.8	59.2	19.1	29.6

4.3 橋梁形式の違いによる塗装の LCC 及び LCVOC 試算結果比較

以下において I 桁橋梁及びトラス橋梁における塗装の LCC 及び LCVOC の比較検討をする。

(1) I 桁橋梁における塗装の LCC 及び LCVOC

図-6 に I 桁橋梁の支間長と経年を変化させた時の LCC 及び LCVOC 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。縦軸は支間長を 30m と設定した従来型 I 桁橋梁における初期のコスト及び VOC 排出量を基準値、すなわち 1 としたときの値を示している。

図-6(a), (b) より、塗装のコストはライフサイクルを通して合理化橋梁が低く、その差は都市部の方が大きい。一方、塗装の LCVOC は、図-6(c), (d) より、コストと同様にライフサイクルを通して合理化橋梁が小さくなるものの、その差は支間長が短くなるにつれて小さくなるのが分かる。この傾向は山間部、都市部共に見られる。

次に、LCVOC を定量的に比較しやすいように、図-6 に示す三次元の図を、各支間長に固定して着目して二次元にした図を示す。図-7 は支間長を 30m と 60m に固定して表示した塗装の LCVOC である。図-7(a) は支間長 30m の場合、図-7(b) は支間長 60m の場合を示している。図-7(a) より、支間長が 30m の場合は初期建設時の VOC 排出量はどれもほぼ同値であり、100 年経過すると従来型橋梁の LCVOC が合理化橋梁と比して、山間部においては約 1.2 倍、都市部においては約 1.4 倍となる。

一方、支間長が 60m の場合の図-7(b) では、初期建設時で既に従来型橋梁が合理化橋梁の約 1.8 倍となり、100 年経過すると従来型橋梁の LCVOC が合理化橋梁と比して、

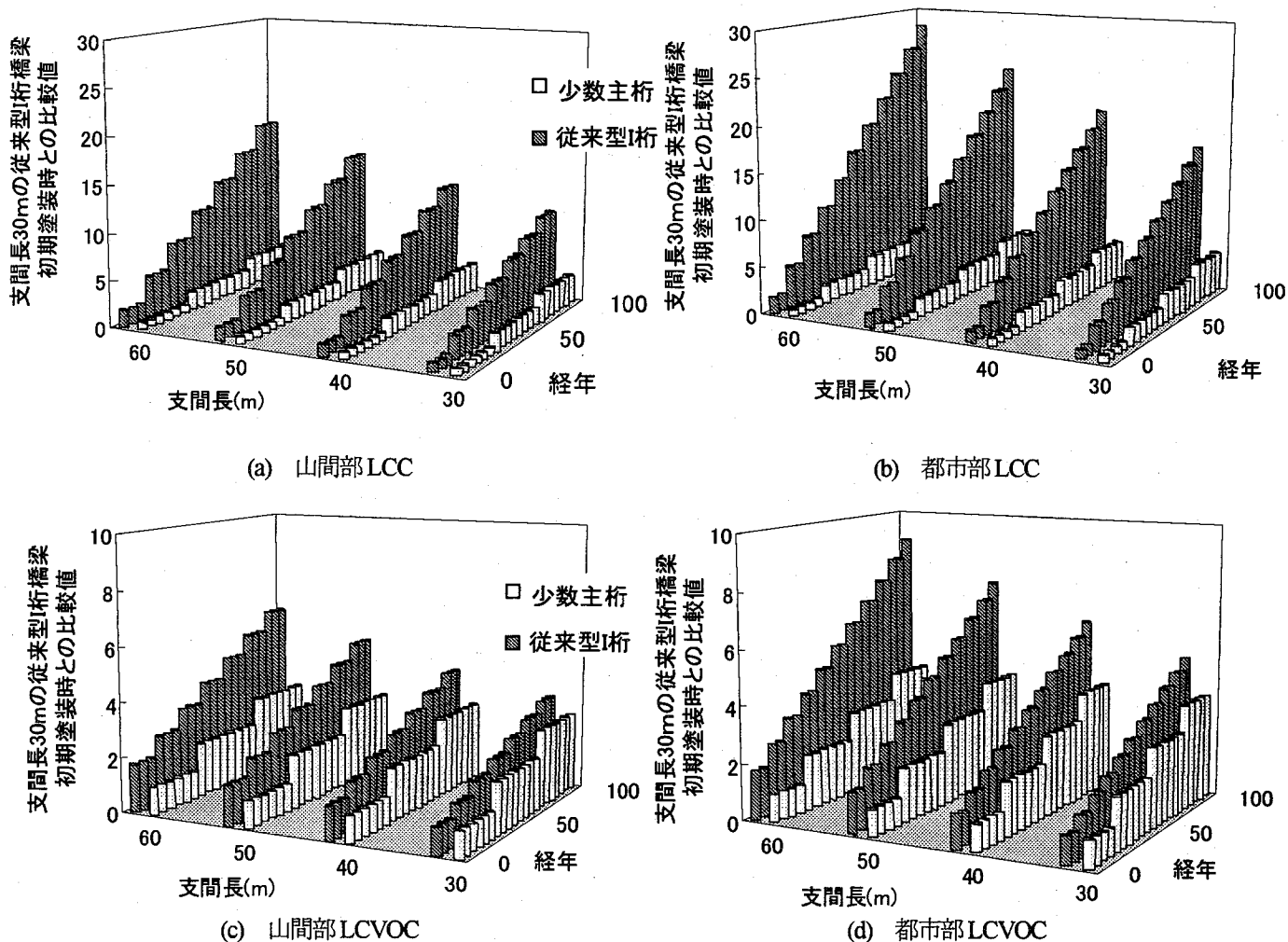


図-6 I桁橋梁のLCC及びLCVOC

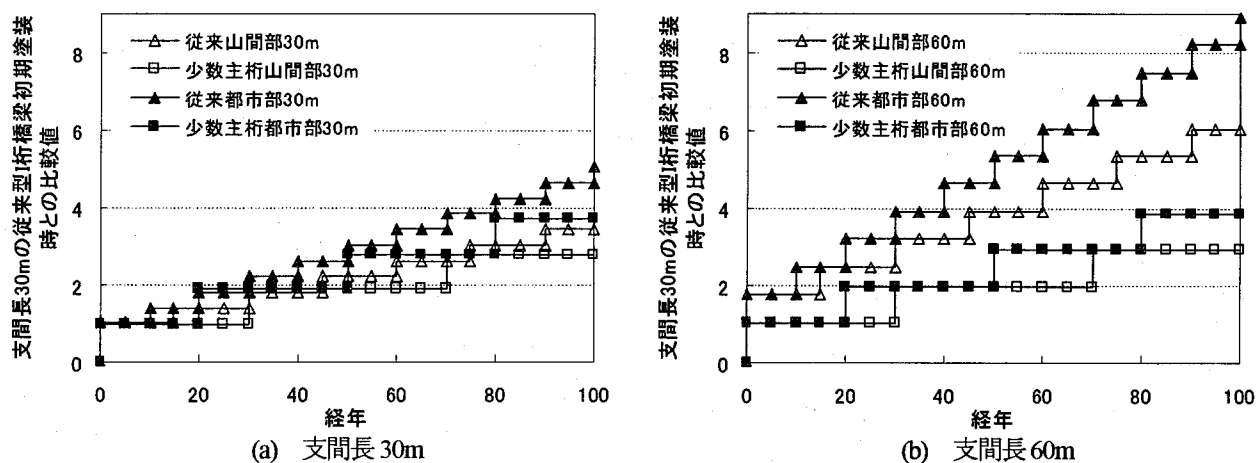


図-7 支間長を固定したLCVOC

山間部においては約2.1倍、都市部においては約2.3倍となる。また、従来型橋梁と合理化橋梁それぞれの山間部と都市部を比較すると、支間長に依存することなく、従来型橋梁では都市部が山間部の1.5倍、合理化橋梁では1.3倍となる。以上の知見から、従来型I桁橋梁のLCVOCは支

間長の影響を大きく受けるが、合理化橋梁ではほとんど影響しないことが確認された。これにより、従来型橋梁と合理化橋梁の差は支間長が長くなるにつれ大きくなることがわかる。これはVOC排出量が塗装面積に大きく関係しているからであり、図-4で示した塗装面積の比較からも

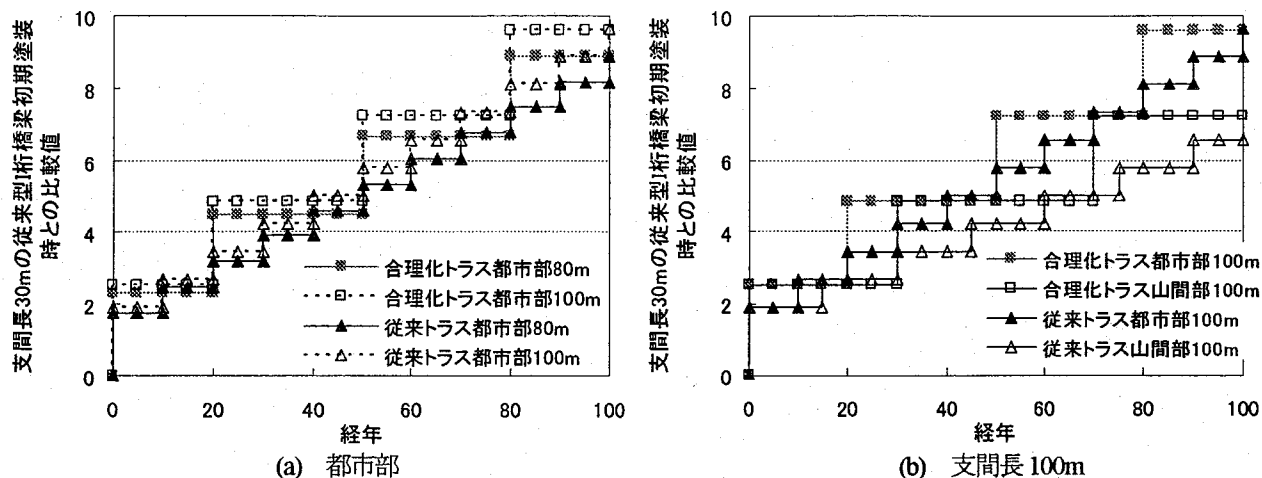


図-8 支間長を固定したLCVOC

明らかなように、その差は支間長に大きく依存する。また、山間部初期建設時における環境負荷が従来型橋梁と合理化橋梁とでほとんど差が生じない。これは、合理化橋梁では塗装面積が削減されるものの、合理化橋梁で採用している塗料の使用量が従来型橋梁で採用している塗料の約2倍と多いことが理由であり、塗装面積の削減と塗料使用量が相殺してほぼ同値になったと考えられる。

(2) トラス橋梁における塗装のLCC及びLCVOC

図-8にトラス橋梁の支間長80mと100mに着目して表示した塗装のLCVOCを示す。縦軸はI桁橋梁と同様に、支間長を30mと設定した従来型I桁橋梁における初期のコスト及びVOC排出量を基準値としたときの値である。図-8(a)に支間長80mと100mの場合の都市部における比較を、図-8(b)に山間部と都市部における支間長100mの比較を示す。図-8(a)より、支間長が80mの場合、初期建設時のVOC排出量は合理化橋梁が従来型橋梁の約1.3倍であるが、100年経過すると合理化橋梁が約1.1倍となり、ライフサイクルを通して合理化橋梁のVOC排出量が大きくなることからわかる。また、支間長が100mの場合を同様に比較すると、100年経過時には従来型橋梁と合理化橋梁のVOC排出量はほぼ同値となる。

一方、支間長が100mの場合の図-8(b)では、100年経過すると従来型橋梁のVOC排出量が合理化橋梁と比して、山間部においては約0.9倍、都市部においては約1.0倍となり、ほぼ同値となる。また、従来型橋梁と合理化橋梁それぞれの山間部と都市部を比較すると、従来型橋梁では都市部が山間部の1.5倍、合理化橋梁では1.3倍となり、I桁橋梁と同様の知見が得られる。

以上より、トラス橋梁における従来型橋梁と合理化橋梁のLCVOCはほぼ変わらないことが確認された。これは、表-5に示したように、合理化橋梁の塗装面積は従来型橋梁と比して小さいものの、合理化橋梁の塗装面積低減率がI桁橋梁のそれより低く、その結果、I桁橋梁では使用塗料量の影響を相殺して合理化橋梁のLCVOCを低減できたが、トラス橋梁では相殺までできずに合理化橋梁の

LCVOCが低減されなかったことが原因と考えられる。

以上より、LCVOCは塗装面積と使用塗料量に依存し、塗装面積が従来型橋梁より削減されている合理化橋梁のLCVOCが、必ずしも低くなるとは限らないことが確認された。よって今後、低環境負荷に向けた技術開発を進めるに当たっては、構造の簡素化のみならず、塗料などの使用材料に対しても着目する必要があるといえる。塗装においてはVOC含有量を低減した塗料の実用化に向けた開発を進めることが望ましいと考える。

4.4 塗替え周期を変えた場合の比較

鋼橋のライフサイクル評価においては、各部材の更新期間の設定が大きく影響し、これをいかに精度よく仮定するかが重要である。この認識から、各部材の寿命の把握・予測を目的とした調査・研究も数多く行われてきており、橋梁分野において1つの大きな課題となっている。

これまで、新規塗装と塗替え塗装の更新期間、すなわち1回目と2回目以降の塗替え周期は変わらないと仮定して試算を行った。しかし、実際は塗替え回数を重ねるごとに塗替え周期が短くなる傾向にあることがわかっている²⁵⁾。その原因としては、現場塗替え塗装では完全にさびを落とせないことや、付着塩分を十分に除去できないことなどが挙げられる²⁶⁾。

そこで、これまでの塗替え周期をケース1として、2回目以降の塗替え周期を短く仮定した2つのケースを追加して、それらの比較検討を行う。各ケースの塗替え周期年

表-11 塗替え周期の仮定(山間部)

	1回目	2回目		1回目	2回目
従来型	A-1	a-1	合理化	I	c-1
ケース1	15年	15年	ケース1	30年	40年
ケース2	15年	12年	ケース2	30年	32年
ケース3	15年	5年	ケース3	30年	14年

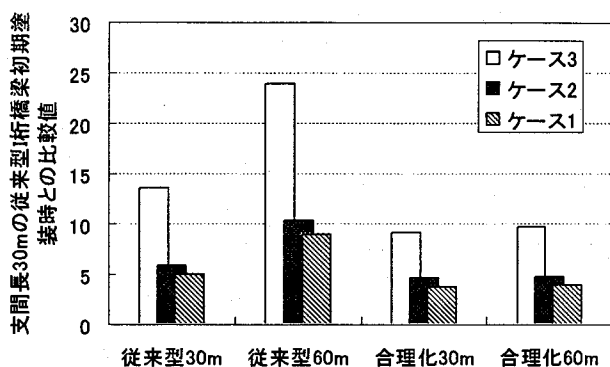


図-9 I桁橋梁(都市部)の100年経過時のLCVOC

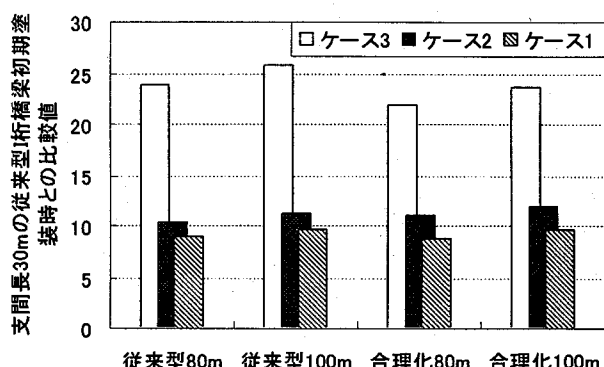


図-10 トラス橋梁(都市部)の100年経過時のLCVOC

表-12 環境にやさしい塗装仕様¹⁰⁾

塗装系	下塗り	ミスコート	下塗り	中塗り	上塗り	削減率(%)
C-4	無機ゾンクリッチ ペイント 700g/m ²	エポキシ樹脂塗 料下塗 160g/m ²	エポキシ樹脂下塗り(2回) 300g/m ²	ふっ素樹脂塗料 中塗 170g/m ²	ふっ素樹脂塗料 上塗 140g/m ²	基準値
1			無用剤形変性エポキシ樹脂 塗料下塗 300g/m ²			36.8
2			無用剤形変性エポキシ樹脂 塗料下塗(2回) 300g/m ²	—		49.6

数を表-11に示す。

ケース2では、文献²⁵⁾における実際の塗替え周期データを考慮して、2回目以降の塗替え周期を、初期塗装寿命×0.8と仮定した。

ケース3では、伊藤ら²⁷⁾の塗替えを考慮した環境促進実験の結果を参考とした。この実験によると、塗替え塗装鋼板の寿命は新規塗装と比して約36%以下となる。このデータを参考にして、ケース3は最も厳しい条件として、初期塗装寿命×0.36と仮定した。

以下に、ケース2及びケース3の場合の、I桁橋梁及びトラス橋梁における塗装のLCC及びLCVOC試算結果の比較評価を示す。

図-9に都市部におけるI桁橋梁の100年経過時のLCVOCを示す。同様に、図-10に都市部におけるトラス橋梁の100年経過時のLCVOCを示す。I桁橋梁では支間長が30mと60mの場合、トラス橋梁では支間長が80mと100mの場合それぞれのケース1～3をまとめて示している。図-9、11より、I桁橋梁とトラス橋梁の従来型橋梁と合理化橋梁全てにおけるLCVOCは、ケース2においてはケース1の1.2倍、ケース3においてはケース1の2.5倍以上となった。LCCにおいても、同様の傾向がみられた。これらから、2回目以降の塗替え周期の設定により、LCC及びLCVOCに大きな差が生じることがわかる。よって、より正確なLCC及びLCVOCを試算するには、塗装の寿命をより精度よく把握することが重要であり、そのための更なる調査・研究が必要である。

5. 低溶剤形及び無溶剤形塗料

4. において、従来型橋梁と合理化橋梁におけるLCVOC

表-13 コストとVOC含有量の比較値

	C-4 塗装系	1 塗装系	2 塗装系
コスト	1	0.97	1.05
VOC含有量	1	0.63	0.51

は塗装面積と使用塗装系に依存することを確認した。よって、LCVOCを削減するために、使用塗料自体のVOC含有量を低減することはさらに有効である。

守屋ら¹⁰⁾は、環境にやさしい塗料として、VOCを低減した低溶剤形塗料や無溶剤形塗料を試験的に作製し、耐久性及び施工性の観点から鋼道路橋塗装便覧の塗装仕様であるC塗装系と比較検討を行っている。そのうちの無溶剤形塗料を用いた塗装仕様を、鋼道路橋塗装便覧のC4塗装系と合わせて表-12に示す。塗装系1及び2は、下塗りに無溶剤形塗料を用いることにより、VOC含有量をC4塗装系と比べてそれぞれ36.8%と49.6%だけ削減しており、低環境負荷を実現している。同研究では、これらの防食性能を把握するための暴露試験と実橋試験塗装を現在も継続中であり、この途中結果によると、低溶剤形塗料や無溶剤形塗料の防食性能はC4塗装系とほぼ同程度と、高い防錆効果を有することを確認している。

そこで、表-12に示す塗装系を用いた場合のLCC及びLCVOCを試算した。塗替え周期は、どの塗装系も同等の防錆性能を持つと仮定して、C4塗装系を海岸部で用いた場合の寿命である30年²⁸⁾を用いた。表-13に各塗装系の塗装によるコストとVOC排出量を示す。これはC4塗装系を基準とした値である。図-11にLCC、図-12にLCVOCの試算結果を示す。

図-11及び図-12に示す試算結果は、各塗装系の塗替え周期が同じであると仮定したため、C4塗装系と1塗装

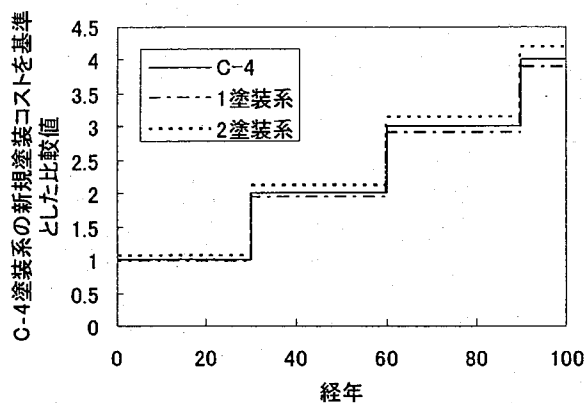


図-11 塗装のLCC

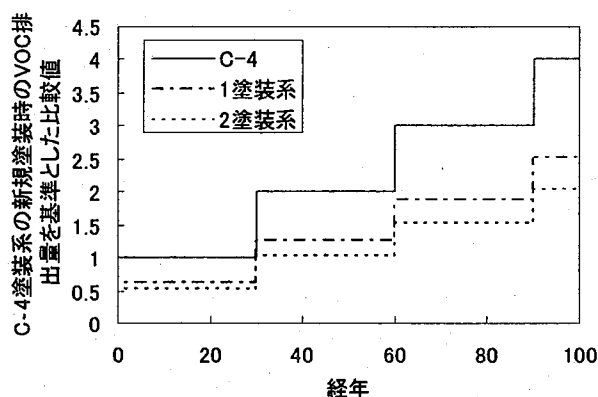


図-12 塗装のLCVOC

系及び2 塗装系のLCC 及びLCVOC の差は表-13 に示した値となった。1 塗装系のLCC はC-4 塗装系の97%であり、2 塗装系のLCC はC-4 塗装系より5%だけ高くなる。一方、LCVOC は1 塗装系及び2 塗装系とも大幅に低減することができることがわかる。

ただし、1 塗装系及び2 塗装系は、塗装作業性や仕上がりが悪いという欠点があり、この欠点により塗装工事のコストはさらに増えることが懸念され、LCVOC とトレードオフの関係になることが予想される。よって、今後さらなる技術開発を行う必要がある。

6. 結論

本研究において、I 桁橋梁及びトラス橋梁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、二酸化炭素排出量及び揮発性有機化合物(VOC)排出量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) 橋梁のライフサイクル二酸化炭素排出量における塗装の占める割合は、橋梁のライフサイクルコストにおける塗装の占める割合の半分近くしかなく、塗装はコストの割に二酸化炭素排出量への影響が小さい。
- 2) 山間部と都市部における塗装のライフサイクル VOC 排出量は、都市部が山間部の1.3~1.5 倍となる。
- 3) I 桁橋梁における塗装のライフサイクル VOC 排出量は、従来型橋梁と合理化橋梁の初期建設時の VOC 排

出量は、ほぼ同値~1.8 倍であるが、100 年経過すると従来型橋梁のライフサイクル VOC 排出量が合理化橋梁と比して、約1.2~2.3 倍となる。

- 4) 従来型のI 桁橋梁のライフサイクル VOC 排出量は、支間長が長くなるほど従来型橋梁と合理化橋梁のライフサイクル VOC 排出量の差が大きくなる。
- 5) トラス橋梁における従来型橋梁と合理化橋梁のライフサイクル VOC 排出量はほぼ同値である。これは合理化橋梁の塗装面積低減率が低く、使用塗料量の影響を相殺できずに合理化橋梁のライフサイクル VOC 排出量が低減されなかったことに起因する。
- 6) 塗装面積のみを削減してもライフサイクル VOC 排出量は必ずしも小さくならない。よって、今後の技術開発の方向性としては、塗料などの使用材料に対しても着目する必要がある。
- 7) 塗替え周期が異なる場合の、塗装のライフサイクルコスト及びライフサイクル VOC 排出量を試算した。その結果、最も厳しい条件として塗替え周期を初期塗装寿命 $\times 0.36$ と仮定した場合、ライフサイクルコスト及びライフサイクル VOC 排出量は塗替え周期を一定とした場合の2.5 倍以上となる。よってより正確なライフサイクル評価を行うには、塗替え塗装の寿命をより精度よく把握するための更なる調査・研究が必要である。
- 8) 低溶剤形塗料及び無溶剤形塗料のライフサイクルコストとライフサイクル VOC 排出量は、トレードオフの関係になる可能性があり、さらなる技術開発が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、資料提供や有用なアドバイスをして頂きました、関西ペイント、横河ブリッジの技術者の方々に深く御礼申し上げます。なお、本研究の一部は、平成17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) 土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン、2001。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 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) 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

- 集, No.553/VI-33, pp.187-199, 1996.
- 6) 社団法人 日本橋梁建設協会: 新しい鋼橋の誕生, 1998.
- 7) 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, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1305, 1999.
- 8) 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.1261-1272, 2000.
- 9) 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, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1109-1118, 2001.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 坪内佐織, 伊藤義人, 金仁泰: 合理化橋梁のライフサイクルアナリシスに関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1725-1735, 2005.
- 14) 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.
- 15) 北畠道治: 塗料における有害性重金属対策の現状, 塗料の研究 No.140, pp.42-52, 2003.
- 16) 守屋進: 環境にやさしい塗料の耐久性及び施工性試験, 防錆管理, pp.6-11, 1998.9.
- 17) Horvath, A. and Hendrickson, C.: Steel versus steel-reinforced concrete bridges: Environmental assessment, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 4(3), pp.111-117, 1998.
- 18) 嘉瀬井一彦, 岩見勉, 藤城正樹, 守屋進: 鉛・クロムフリー塗料の耐久性評価(一般防錆顔料並びに航空標識塗料の品質評価), 防錆管理, pp.11-16, 2005.
- 19) 北畠道治: 大気汚染防止法改正(VOC 排出抑制), 塗料の研究 No.143, pp.41-49, 2005.
- 20) 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.
- 21) 社団法人 日本橋梁建設協会: 新しい鋼橋の誕生 II, 2003.
- 22) 社団法人 日本道路協会: 鋼道路橋塗装便覧, 1988.
- 23) 日本道路公団: 構造物施工管理要領, 1999.
- 24) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2000.
- 25) 社団法人 日本鋼構造協会: 鋼橋塗膜の評価技術(その2. 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討), 1998.
- 26) 片脇清士: 橋と塗装, 社団法人日本鋼橋塗装専門会, 1996.
- 27) 伊藤義人, 金仁泰, 貝沼重信, 門田佳久: 素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.291-307, 2004.
- 28) 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.

(2005年9月10日受付)