

環境に配慮した鋼構造物をめざして
- 鋼橋のLCCからのアプローチ -

Optimum Application of Steel Structures
Considering Environmental Issues
-LCC approach on steel bridges-

三木千壽^{*}, 山口亮太^{**}
Chitoshi MIKI and Ryota YAMAGUCHI

ABSTRACT In order to examine the effects of construction, maintenance, repair and replacement on environment, Life Cycle Cost (LCC) for certain bridges are evaluated. This LCC model includes social costs caused by repair and renewal besides the sum of initial costs, maintenance costs and renewal costs. The factors of social costs are traffic delay costs, traffic accident costs and environmental costs.

KEYWORDS : 道路橋, ライフサイクルコスト, 社会的損失
highway bridge, Life Cycle Cost, social cost

1. まえがき

シンポジウムのプログラムを見ると、材料の製造およびリサイクル、腐食対策、騒音問題といった環境に関係した個別技術に関する研究報告が予定されている。したがって、ここでは少し見方を変えて、筆者らが提案している鋼橋に対するライフサイクルコスト (LCC) 評価によって、環境へのインパクトについて考察をする。すなわち、鋼橋の建設・補修・架替えを、環境への影響や交通規制等による社会的な影響を費用便益分析のコンセプトに基づいて定量的な評価を試みる。

西川は1994年に道路橋の寿命や維持管理に関するレビュー論文¹⁾の中で、LCCの概念や試算について紹介し、LCCの試算から、更新を前提としたLCC最小のマネジメントは道路橋には馴染まず、更新を行わない工学的永久橋を目指すべきであると結論づけている。また西川らが1997年にミニマムメンテナンス橋について行った検討^{2),3)}では、道路橋独自のLCC評価手法を提案し、LCCを用いてミニマムメンテナンス橋導入について評価結果をまとめている。本研究は、環境を含む社会的損失の定量的な評価を含むLCCから、西川の提案する工学的永久橋あるいはミニマムメンテナンス橋の概念の裏付けを試みたものとも言える。

2. 社会的損失を考慮するためのLCC

(1) LCCの項目

図-1に鋼橋のLCCで考慮すべき項目をあげる。維持管理および更新費の中で環境への影響を含む社会的損失を考慮している。道路におい

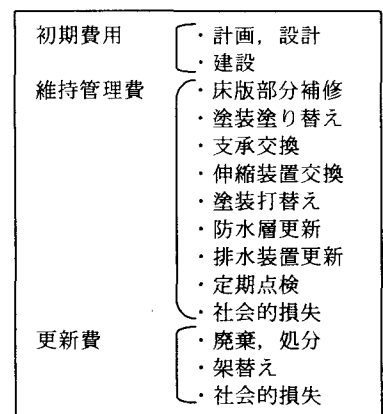


図-1 LCCの項目

^{*}フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{**}学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 修士課程 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

て、補修等の工事で通行止めや車線規制を行うと、渋滞などにより社会に損失を与えるが、それらを LCC に含めていることが本モデルの特徴である。

本 LCC モデルのもう一つの特徴は、橋単体としてではなくネットワークで考えているところにある。ある道路で通行止めや車線規制を行うと、そこを通行しようとした車は他の道路へ迂回する。すると、迂回に使われる道路は交通量が増加する。このようにある道路の交通規制は、その道路だけでなく周辺の道路にも影響を与える。道路橋の LCC に社会的損失を考えていく場合にも、このことに注意していかなければならない。すなわち、道路橋は単体で存在しているのではなく、交通ネットワークの一部として存在しているということであり、ネットワーク全体として評価する必要がある。

(2) 社会的損失の貨幣換算

社会的損失を算出するために考えられる要素を図-2 にあげる。これらのほとんどは、土木計画、交通工学等の分野の既存の研究成果に基づけば、貨幣評価原単位の値を用いて表すことができる⁴⁾。貨幣評価原単位の一例として、表-1 に時間価値原単位を示す。時間価値原単位は車種別、平日・休日別に設定されている。乗用車および

バスは1時間あたり労働賃金等を用いて乗員一人あたりの時間価値を算出し、車種別の乗車人数を考慮して全乗員の時間価値とし、これに車両の使用量相当額を加えて、車種別の1台当たりの時間価値原単位としている。貨物車については、同様の方法で時間価値を算出した上、さらに貨物の時間価値として貨物価格の金利相当分を加えて時間価値を設定している。走行費用原単位は、燃料費、オイル、タイヤ、チューブ、車両整備、車両償却を考慮し、道路種類別、沿道状況及び道路状況別に設定している。また、大気汚染、騒音、地球環境についても貨幣評価原単位が設定されている。なお、本研究では渋滞による物価の上昇および上り・下りの違いについては考慮していない。

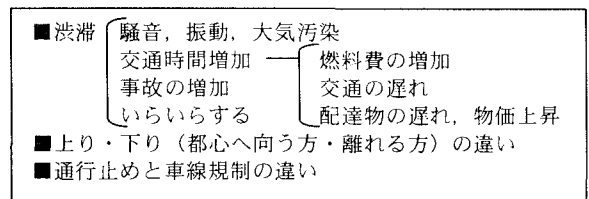


図-2 社会的損失の要素

表-1 時間価値原単位（平成11年価格）⁴⁾

車種	平日	休日
乗用車	56	84
バス	496	744
乗用車類	67	101
小型貨物車	90	90
普通貨物車	101	101

(3) 試算モデルと社会的損失の算出方法

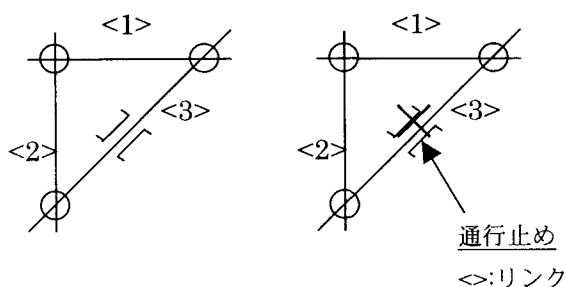


図-3 リンク図

社会的損失の算出において、本研究では表-2 に示す⁴⁾項目を考える。社会的損失を算出するにあたり、対象とする橋梁の存在する道路だけでなく、渋滞の影響が生じる周辺の道路すべてを考慮する必要がある。ここでは図-3 のような簡単な交通ネットワークを設定し、社会的損失を算出する。対象とする橋梁は、リンク3に存在し、床版更新と橋梁架替え期間中、リンク3が通行止めになると仮定する。道路の条件および交通量を表-3,4,5 に示す。実際には交通量配分計算を行って交通量や走行速度等を決定しなければならないが、ここではリンク3を通過していた交通は全てリ

表-2 本研究で考慮する社会的損失

項目	原因
走行時間による損失	走行時間の変化から生じる。
走行費用の損失	走行にかかる費用の差から生じる。
交通事故に関する損失	交通事故損失額の差から生じる。
環境に関する損失	環境に与える影響の変化から生じる。
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 大気汚染 ➢ 騒音 ➢ 地球温暖化 	

表-3 道路条件

リンク	リンク長(km)	沿道条件	車線数	主用交差点数	中央帯有無
1	0.6	DID	2	1	なし
2	0.8	DID	2	1	なし
3	1.0	DID	2	1	なし

リンク 1,2 を迂回すると仮定した。また、床版更新と橋梁架替えには通行止め 50 日（年間の平日・休日割合より平日 33 日，休日 17 日），床版部分補修では通行止め等による社会的損失は発生しないと仮定し，文献 4) を参考に以下のように貨幣換算した。

a) 走行時間による損失(表-6)

走行時間費用の損失は以下のように求められる。

$$\text{平日走行時間費用} = \text{交通量} \times \text{走行時間} \times \text{平日時間価値原単位} \quad (1)$$

$$\text{休日走行時間費用} = \text{交通量} \times \text{走行時間} \times \text{休日時間価値原単位} \times \text{休日交通係数} \quad (2)$$

b) 走行費用の損失(表-7)

走行費用の損失は以下のように求められる。

$$\text{走行費用} = \text{交通量} \times \text{リンク長} \times \text{走行費用原単位} \quad (3)$$

c) 交通事故に関する損失(表-8)

交通事故の損失額は道路・沿道区分により異なる。ここでは一般道路・DID・2 車線の条件より，リンクの交通事故損失額 Y を以下のように求められる。

$$X_1(\text{走行台キロ(千台} \cdot \text{km/日)}) = \text{日交通量} \times \text{リンク長} \quad (4)$$

$$X_2(\text{走行台} \cdot \text{交差点数(千台} \cdot \text{箇所/日)}) = \text{日交通量} \times \text{主要交差点数} \quad (5)$$

とすると，

$$Y = 2060X_1 + 530X_2 \quad (6)$$

d) 環境に関する損失(表-9, 10)

環境への影響はリンク速度により与えられる。

○大気汚染

小型車混入率を a_1 ，大型車混入率を $a_2 (= 1 - a_1)$ ，交通量(台/日)を Q とすると，走行速度 30km/h の場合，以下のように算出できる。

表-4 通常の交通量

リンク	乗用車類 (台/日)	小型貨物 (台/日)	普通貨物 (台/日)	合計	日平均走行時間(分)	日平均速度 (km/h)
1	13,000	5,000	3,000	21,000	1.20	30
2	5,000	2,000	1,000	8,000	1.37	35
3	6,000	2,000	1,000	9,000	1.71	35

表-5 工事期間の交通量

リンク	乗用車類 (台/日)	小型貨物 (台/日)	普通貨物 (台/日)	合計	日平均走行時間(分)	日平均速度 (km/h)
1	19,000	7,000	4,000	30,000	1.44	25
2	11,000	4,000	2,000	17,000	1.60	30
3	-	-	-	-	-	-

表-6 走行時間費用

(単位:千円/日)

リンク		平日			休日		
		乗用車類	小型貨物	普通貨物	乗用車類	小型貨物	普通貨物
1	工事期間	1,833	907	582	2,459	807	518
	通常時	1,045	540	364	1,402	481	324
	損失	788	367	218	1,057	326	194
2	工事期間	1,179	576	323	1,582	513	288
	通常時	459	247	139	616	220	123
	損失	720	329	197	966	293	165
3	工事期間	-	-	-	-	-	-
	通常時	689	309	173	925	275	154
	損失	-689	-309	-173	-925	-275	-154

表-7 走行費用

(単位:千円/日)

リンク		平日		
		乗用車類	小型貨物	普通貨物
1	工事期間	222	141	98
	通常時	140	96	70
	差	82	45	28
2	工事期間	158	102	62
	通常時	72	50	31
	差	86	52	31
3	工事期間	-	-	-
	通常時	108	62	39
	差	-108	-62	-39

表-8 交通事故損失額 (単位:千円/年)

リンク	工事期間	通常時	差
1	52,980	37,086	15,894
2	37,026	17,424	19,602
3	-	23,310	-23,310

環境への影響(g/km/日)=(0.24a₁+2.87a₂)Q (7)

貨幣評価値=環境への影響×貨幣評価原単位
×リンク長×工事日数 (8)

○騒音

走行速度 30km/h の場合

A=10・log(a₁+4.4a₂)+10・log(Q/24) (9)

とすると

環境への影響 (dB(A)) =38+A (10)

貨幣評価値=環境への影響×貨幣評価原単位
(DID の場合 2,400,000 円/dB(A)/km/年)
×リンク長×工事日数÷365 (11)

○地球温暖化

走行速度 30km/h の場合

Co₂ 排出量(g-c/km/日)=(54a₁+155a₂)Q (12)

貨幣評価値= Co₂ 排出量×貨幣評価原単位(DID の場合 2,300 円/ton-c)×リンク長
×工事日数 (13)

(4) 橋梁モデル

表-11 各モデルの形式

モデル	1	2	3	4	5
橋梁形式	鋼単純非合成 I 桁橋				
橋長	30.7m				
幅員	10.5m				
床版	RC		PC	RC	PC
架替え	有り	無し			
伸縮装置	鋼製フィンガージョイント				
支承	BP 支承				
使用鋼材	普通鋼材			耐候性鋼材	
工場塗装	鉛系さび止め塗料		亜鉛メッキ	-	
現場塗装	長油性7/8酸樹脂塗料		-	-	

LCC の試算の対象としての橋梁については、文献 2)に紹介されている 4モデルと、文献 5) から 1モデルの計 5モデルを設定した。設定したモデルは表-11 に示す通りである。

また、橋梁を構成する各要素の補修等の周期、費用をそれぞれ表-12,13 の通り設定した。モデル 1~4については、文献 2)を参考にした。また、モデル 5 に対しては、文献 5)を参考にモデル 3 に耐候性鋼材を

表-9 環境への影響

リンク	工事期間			通常時		
	大気汚染 (g/km/日)	騒音 (dB(A))	Co ₂ 排出量 (kg-c/km/日)	大気汚染	騒音	Co ₂ 排出量
1	20,860	69.59	2,470	12,930	69.14	1,437
2	9,340	67.96	1,120	4,550	64.77	533
3	-	-	-	4,790	65.13	587

表-10 環境への影響の貨幣評価値 (単位:千円/年)

リンク	工事期間			通常時			差
	大気汚染	騒音	地球温暖化	大気汚染	騒音	地球温暖化	
1	1,827	13,531	170	1,133	13,638	99	658
2	1,091	17,875	103	531	17,035	49	1,454
3	-	-	-	699	21,413	68	-22,180

表-12 補修等の周期

項目		周期	注
橋梁架替		60 年毎	周期が重なる場合、上位(架替・打替・部分補修の順)工事を実施
床板	打換	40 年毎	
	部分補修	20 年毎	
	RC	50 年毎	
塗装塗替		10 年毎	亜鉛メッキ、耐候性鋼材は塗替なし
支成交換		30 年毎	
伸縮装置交換		10 年毎	
定期点検		10 年毎	

用いた設定とした。

試算期間は 100 年とした。文献 1),2),6)において橋梁の寿命について述べられているが、それらを参考に架替えを 60 年としたこと、また社会的割引率を考えると将来の費用が無視できるほど小さくなってしまふことから、100 年を設定した。社会的割引率は 4%として計算する 4)。

3. ライフサイクルコストの評価方法

本研究では、費用便益分析の考え方をを用いて道路橋の LCC を検討する。費用と便益は、言葉こそ異なるが同じ事を意味している。すなわち、費用とは負の便益と言える。従来の LCC では費用のみに注目してきたが、費用便益分析を行う上では便益も考えなくてはならない。

本来橋梁の無いところに橋梁を建設すると、そこには新たに交通が生じ、それに伴い新たな便益が発生する。一方、補修や架換えを行うと、交通渋滞等の影響により、その年の便益は平年を下回ることになる。このことを模式的にあらわすと図-4 のようになる。

経済評価では、異なる時間に発生する費用や便益をそのままの値で合計することは適当でない。そのため、社会的割引率を用い、評価を行う現在の値(現在価値)に換算することが、一般的に行われている。例えば、時間 t における費用 C_t を社会的割引率 r を用いて現在価値になおすと次のようになる。

$$\frac{C_t}{(1+r)^t} \leftrightarrow C_t \quad (14)$$

現在価値 時間 t

費用便益分析では、便益と費用の差(純現在価値)、または便益と費用の比(費用便益比)でプロジェクトを評価する。本研究の LCC 評価では貨幣単位となる前者で考えることにする。

図-4 において、

C_t : t 年後の維持管理費用, C_0 : 初期費用(建設費)

B_t : t 年後の便益, T : 設定年数, r : 社会的割引率

とすると、純現在価値(NPV: Net Present Value)は、

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (15)$$

$$B_t = f(\text{レーン数等 } (C_0), \text{ 補修時交通渋滞等 } (C_t))$$

$$C_0 = f(B_t, \text{ 維持管理方法 } (C_t))$$

$$C_t = f(B_t, C_0)$$

表-13 各モデルの費用

モデル	1	2	3	4	5
材料・塗装費	14,500			17,100	14,500
加工費	19,500			20,300	19,500
床版・舗装費	15,700	36,400		15,700	36,400
輸送・架設費	10,200			10,600	10,200
現場塗装費	2,200			-	-
耐鋼製仕様	-			-	2,464
合計	62,100		82,800	63,700	83,064
橋梁架替	186,300	-	-	-	-
床版打替	51,700	-		51,700	-
床版部分補修	10,100				
塗装塗替	9,200		-		
支承交換	10,400				
伸縮装置交換	7,000				
定期点検	1,000				

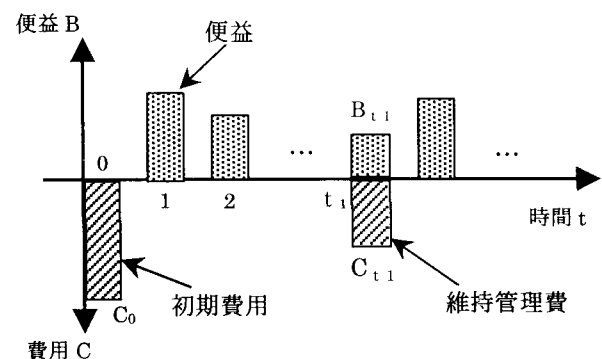


図-4 費用と便益

と表せる。ここで、 B_t 、 C_0 、 C_t がどのようなパラメータに依存しているのか考えてみる。

便益(B_t)、初期費用(C_0)、維持管理費(C_t)の3者は相互に関連を持っている(図-5)。例えば、便益(B_t)が大きければ、初期費用(C_0)も大きくしてよい。しかし、 B_t が小さければ C_0 を大きくする必要はない。また、この C_0 によって、供用後の維持管理費(C_t)も変化する。本来はこの3者の関係を考慮する必要があるが、本研究では「長さ・車線数が同じであるいくつかの橋梁モデルから、1つの橋梁を選択する」場合の評価方法を検討する。すなわち、ここで C_0 、 C_t は B_t に依存しないと仮定する。

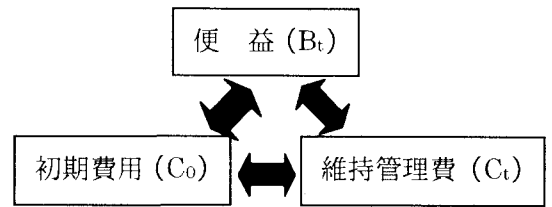


図-5 費用と便益の相互関係

ある場所に道路橋を建設する場合、長さ・車線数が一定ならば、どのような形式の橋を建設しても生み出される便益は同じである。したがって、

$$B_t = B_{const} - \Delta B_t \quad (16)$$

ただし

ΔB_{const} : 平年の便益

ΔB_t : t年後の維持管理等に伴う損失便益

とおくと、

$$\begin{aligned} NPV &= \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \\ &= B_{const} \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{\Delta B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。よってLCC評価においては、式(17)内の

$$- \sum_{t=0}^T \frac{\Delta B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (18)$$

について検討すればよい。これは、従来のLCCに便益の損失分(社会的損失)を含める形となる。

$$LCC = \text{初期費用} + \text{維持管理費} + \text{更新費} + \text{社会的損失} \quad (19)$$

4. ライフサイクルコストの試算

(1) 社会的損失を含まない場合

社会的損失を含む場合と含まない場合のLCCを比較するため、まず社会的損失を含まない場合のLCCを算出する。

試算結果を図-6に示す。100年後のLCCは小さい順に、モデル4→モデル5→モデル2→モデル3→モデル1となっているが、今回のモデルではそれほど大きな差はない。モデル1は架替えを行っており、架替えが最も大きな要素であることが明らかである。また、現在価値換算しているので、40年ぐらいからは各モデルともLCCの増加が小さくなっている。

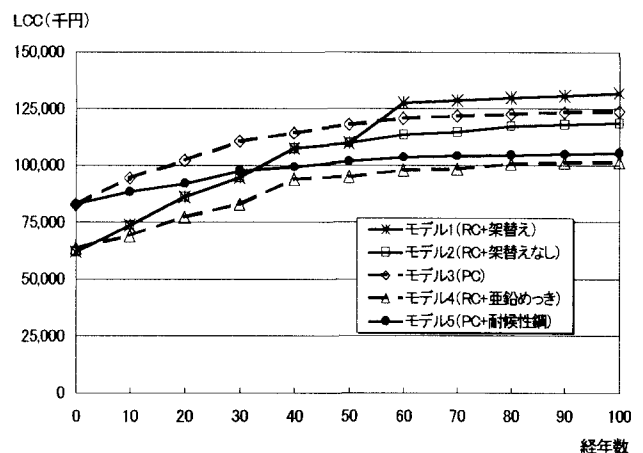


図-6 LCCの比較(社会的損失を含まない)

(2) 社会的損失を含めたライフサイクルコストの試算

2章での試算結果より、床板更新における社会的損失は、走行時間による損失 75,401 千円、走行費用の損失 5,549 千円、交通事故に関する損失 1,669 千円、環境に関する損失 -20,068 千円、合計 62,551 千円となる。各モデルの初期費用が 60,000 千円から 80,000 千円であるから、今回の社会的損失はこの初期費用分に相当するものとなっている。この損失を LCC に含めて、社会的損失を考慮した LCC 評価を行った。試算結果を図-7 に示す。100 年後の LCC は小さい順にモデル 5 → モデル 3 → モデル 4 → モデル 2 → モデル 1

となっている。社会的損失を考慮しない図-6 と比較すると、このケースでは社会的損失が LCC の評価に大きな影響を与えることがわかる。また、モデル 1,2,4 のように補修・架替えを行うほど維持管理費用、社会的損失により、LCC が大きくなっている。すなわち、橋本体の架替え、床版の打換えといったことを行わないことが最も重要であり、本体構造や床版構造のグレードを上げることによる初期建設費の上昇は、社会的損失を考えることにより、LCC の中では極めて小さいことになる。

ここで今回、環境に関する損失がマイナスの値を示しているのは、通行止めによってリンク 3 に騒音が生じないとしているからである。通行止めでは、リンク 3 の交通をリンク 1,2 に迂回させているので、リンク 1,2 の騒音による損失は確かに上昇するが、式(9)のように対数を用いているため、大きな上昇とはならない。したがって、環境に関する損失はマイナスの値となるのである。しかし、実際には工事による騒音が生じているので、そのことを評価する必要がある。また、表-10 を見ればわかるとおり、リンク 3 は別にしてリンク 1,2 は工事によって 2,112 千円の損失が生じている。これは交通事故による損失を上回っている。このことから、工事の環境に与える影響は大きいものであることがわかる。

本研究での環境に関する損失は、前述のとおり土木計画、交通計画分野での既存の研究を基に行っている。したがって、大気汚染、騒音、地球温暖化といった 3 項目について検討している。しかし、今後は道路橋もしくは鋼橋に沿った独自の環境質を考えて、どのような損失が生じているのかを評価していく必要がある。

5. まとめ

本研究で試算したケースでは、社会的損失が LCC に大きな影響を与えている。これは、道路橋の LCC 評価において、社会的影響を考慮することが重要であることを示唆している。しかし、どのような条件で LCC を評価しても橋梁の架替えは支配的な因子であり、架替えない、西川の提案する工学的永久橋がベストということになる。

ここでの評価には含んでいないが、欧米で極めて深刻な課題とされているのが、ペンキの塗替え時に発生する鉛の環境および作業員への影響である。鉛以外の重金属や有機溶剤についても同様である。そのようなことを考えると、既設橋梁についても工学的永久橋を目指したレトロフィットがベストな解となる可能性が高い。

なお、本研究の LCC は、多くの仮定のもとで行っており、仮定したパラメータを一つ一つ詳細に決定していく必要がある。特に、初期費用と便益、維持管理費については本来相互に関連があり、この部分を含めた評価方法が今後の課題である。また、今回は社会的影響について、維持管理による通行止めのみについて検討したが、実際には車線規制や、時間を区切ったの通行止めなど多くのパターンが考えられるので、さらに多くのケーススタディを行わなければならない。

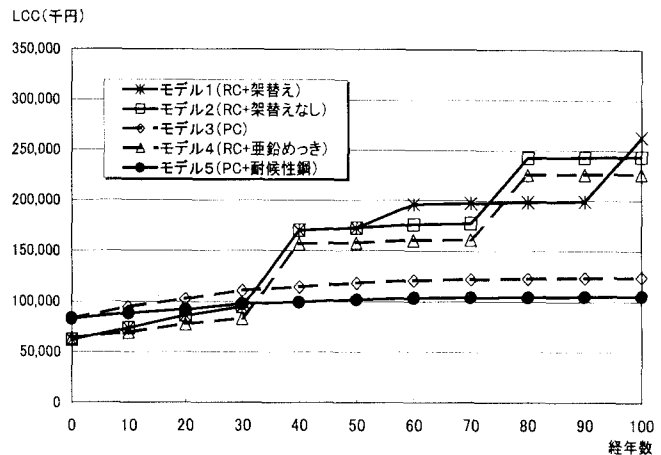


図-7 LCC の比較 (社会的損失を含む)

謝辞：本研究の遂行にあたり，東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻の上田孝行助教授より多くの示唆，助言をいただいたことを記し，感謝の意を表する。

参考文献

- 1)西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.1-10，1994.10.
- 2)西川和廣，村越潤，山本悟司，上仙靖，福地友博，中嶋浩之：ミニマムメンテナンス橋に関する検討，土木研究所資料 第 3506 号，1997.6.
- 3)西川和廣：ライフサイクルコストを最小とするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，Vol.31，No.8，pp.64-72，1997.8.
- 4)道路投資の評価に関する指針検討委員会編：道路投資の評価に関する指針(案)，(財)日本総合研究所，1998.
- 5) (社)鋼材倶楽部 橋梁研究会 耐候性鋼 WG：最近の耐鋼性橋梁に関する調査・検討資料，土木学会 鋼構造委員会 構造物の維持管理に関する研究小委員会 第 9 回委員会資料，1999.12.
- 6)伊藤満，栗田章光，鈴木博之，吉川紀：鋼道路橋の建設・管理，明星大学出版部，1998.