

消費者余剰を考慮した道路橋 RC 床版の最適補修対策

Optimal maintenance planning for RC decks of highway bridges
for consumer surplus

古田 均*, 保田敬一**, 築山 勲***, 竹林幹雄****

Hitoshi Furuta, Keiichi Yasuda, Isao Tsukiyama and Mikio Takebayashi

*工博, 関西大学教授, 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)

**博(工), (株)ニュージェック, 道路 G (〒135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)

***工修, 関西大学大学院, 総合情報学研究科 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)

****工博, 神戸大学准教授, 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

In recent years, bridge engineering concern has shifted from the construction of new highway bridges to the maintenance of existing ones. In this study, an attempt is made to develop an optimal maintenance plan for reinforced concrete (RC) decks of highway bridges. Emphasis is placed on how to obtain an appropriate order of repair for the existing decks by considering the characteristics of the road network and the concept of life cycle cost. This optimal maintenance planning is formulated as a cost benefit problem for consumer surplus. Genetic algorithm (GA) is employed here to find a practical and rational solution for the maintenance problem.

Key Words: Life cycle cost, RC decks, Optimal repairing, GA, User cost, consumer surplus

キーワード: LCC, RC 床版, 最適補修法, GA, ユーザーコスト, 消費者余剰

1. はじめに

我が国の道路橋は、2004 年時点で橋長 15m 以上の主要なものだけでも 146,082 橋¹⁾という膨大な数に達している。その多くが 1955 年から 1973 年にかけての高度成長期に集中的に整備された。2030 年頃には、供用年数 50 年以上の橋梁が過半数を占めると言われている²⁾。今後は維持管理費用が増加するとともに、老朽化のため更新や大規模な補修補強を必要とする時期を一斉に迎えることとなり、予想を上回る膨大な更新事業費が必要となる見込みである。これらの膨大な橋梁を長期にわたって安全に供用するためには、適切な補修や補強を行っていく必要がある。しかし、少子高齢化の進展、生産年齢人口の減少、税収の減少など、国の財政は以前にもまして厳しい状況にあり、維持管理に費やすことのできる予算は自ずと制限される。また、2007 年 8 月 1 日に発生したアメリカ・ミネソタ州・ミネアポリス市における橋梁崩壊事故にみられるように、橋梁点検を含めた維持管理の重要性は今後の日本でも同じことがいえる。道路橋は日々の市民生活や社会経済活動に深く関わっており、その維持管理に伴う道路網や周辺環境への影響などをあ

わせて考慮した上で維持管理計画を立案しなければならない。

維持管理を進めるにあたり、最もよく使われている意思決定のための指標がライフサイクルコスト (LCC: Life Cycle Cost: 以降, LCC と略記) である。LCC を利用したマネジメントは、「計画期間内に計上される総費用を最小化することで効率化が達成される」という明快でわかりやすい考え方をベースにしており、民間資本、社会資本など様々なマネジメントのツールとして利用されている。現在のほとんどの維持管理機関で用いられている LCC 最小化モデルによるマネジメントでは、初期建設費、維持管理費、更新費のみを考慮している。しかし、供用開始後に発生する様々な費用項目、特に維持管理工事時に発生する通行止めによる利用者のコスト上昇や通行止め期間の長期化に伴う社会的損失といった構造物の利用が社会に与える影響を考慮することは少ない。本来、橋のライフサイクルを考えた場合、事業計画段階では費用便益分析などにより構造物の供用が社会に与える影響を明示的に考慮しているのに対し、維持管理段階ではこういった要素は捨象されており、公共管理という一貫性のあるべき維持管理対象において

LCC として考慮する費目がライフサイクルの各段階で異なっているというのは矛盾があるといえる。計画段階での社会的影響と比較して、維持管理に関してはその影響が局所的・限定的と捉えることも可能ではあるが、一方で構造物の維持管理方法に関してライフサイクルでの考え方の一貫性を持たせるための議論も必要であると考えられる。また、方法論的な面で言えば、LCC に社会的損失（広義には厚生の変化）を考慮した研究は最近行われてきているものの、多くは理論的検討にとどまっており、大規模ネットワークを対象とした道路網・橋梁群の維持管理など、実用に供するためには、計算方法も含めた方法論の改善が望まれるところである³⁾。

特に、厚生の変化を考慮する場合、厚生変化の波及の時間的・空間的な定義の差により、厚生変化の規模が異なることが往々にしてある。ここでは、後述する理由から、厚生変化を消費者余剰に限定した議論を行うこととする。

本研究では、道路ネットワーク上に存在する多数の橋梁を対象にして、橋梁を構成する要素の一つである RC 床版を適切に維持管理するための補修計画が提示できる方法を提案する。道路橋の RC 床版は輪荷重を直接支えるため、道路橋を構成する要素の中でも損傷しやすい部位である。

本研究では、計画段階での評価で導入されている厚生変化に整合する形での維持管理の効率性評価を提案することを目的とする。具体的には多くの橋梁群の中から補修すべき橋梁、その補修工法、補修時期を限定された予算制約の中で、渋滞による損失と橋梁の補修の費用の変化量で評価される消費者余剰を考慮する。そして、これらの要素を組み込んだ新たな LCC を対象として、LCC 最小化モデルによる補修順位最適化を試みる。なお、最適化手法には遺伝的アルゴリズム（GA : Genetic Algorithms）を採用する。

2. 本研究の基本的考え方

2.1 厚生変化の評価と維持管理問題

プロジェクトや計画の効果を測るときには、投下される費用（コスト）に対して、得られる「正の効用」を通常「便益（Benefit）」という形で一般的には把握する。換言すると、費用(cost)=負の便益と定義されている。例えば、道路の拡幅工事でいえば、拡幅後渋滞時間が 10 分間短縮されれば、それが「便益」となる。ただし、一つのプロジェクトでも現出する「便益」は様々であり、例えば渋滞の短縮効果もあれば、旅行者の旅行機会の増加、果ては移動時間の短縮により、遠くからの買い物客が増加し、域内の小売り額が増加する、ということまで評価の対象となる場合もある。こういった要素は、時間的・空間的広がりの違いで、計測の規模が異なるため、注意

が必要である。

さて、インフラの整備のように社会的なインパクトが非常に大きい場合、われわれ市民生活全体で、どれほど便益が向上されるのか（あるいは費用が削減されるのか）、を総合的視点で評価する必要が出てくる。ここで重要となるのは、出力としての「純便益（総便益から総費用を差し引いた分）」は多くの場合、インフラに関わる社会全体で共有されることになる、ということである。すなわち「（インフラ利用に関わる）社会全体で共有される純便益」を評価対象とする場合、「便益」ではなく、「便益」や「費用」を一括して表現する「厚生(welfare)」という用語を使用する場合が多い。

厚生は通常「事業を実施する前と後で、経済主体に関してどれほど純便益が増加したか=費用が削減されたか」という変化量で評価される。これは、厚生の変化量が「(本来) 負担されるべき出費項目が削減されたため、これらの資金を他の経済活動に充てられる」ということを意味するため、これを「余剰 (surplus)」と呼ぶ。この余剰の概念も広範囲になるため、インフラの「(直接的な) 利用者の立場」を考慮するのであれば、利用者（厳密には家計となる）の厚生の変化のみに着目した「消費者余剰」を評価することになる。

さて、LCC を補修優先順位付けの意思決定の指標、すなわちマネジメントのツールとして使った維持管理計画に関する研究では、トータルコストと称して直接維持管理（補修）費用だけを扱っている研究がほとんどであった^{4)~7)}。この理由はユーザーコストの算定は困難であったことに起因する。ただし、文献 4)~6)では社会的割引率は考慮している。一方、整備水準は利用者の需要の増減と直接関係し、需要の高下を考慮した整備水準とその整備時期の決定を取り扱った demand-quality interaction（使いやすくなればそれだけ需要が増加する）を考慮した維持管理問題も古くから研究されてきているものの^{8)~10)}、理論的検討にとどまっていることが多い。一方、実用レベルに即した研究においても、環境、騒音、通行止めによる社会的経済損失^{11)~14)}などを考慮している研究はまだまだ少ないといえる。

本稿ではこれらの視点をふまえ、橋梁の利用者の被る渋滞によるユーザーコストの上昇を維持管理費用に勘案し、これらをもって消費者余剰とし、LCC を評価することとする。

2.2 消費者余剰の考え方

消費者余剰は広い概念であるが、これは「消費者に最終的に帰着する厚生（の変化分）」であれば、消費者余剰に勘案される要素になる。例えば、LCC の定義での消費者余剰は、「消費者余剰を勘定する上で考慮すべきユーザーコスト」となる。ゆえに、狭義の消費者余剰として定義されているものは LCC そのものである。LCC は

「橋梁の利用に直接関わっているもののコスト」で勘案されるので、そのコストは最終的に利用者に帰着する。この理由は、サービスの生産者＝管理者の目的関数が利潤でないため、消費者の利害得失と相反することがないことによる。直接整備費用も最終的には料金や税金による利用者の負担なのでこの意味では利益が相反することはない。したがって、「狭義の」と断った理由は「橋梁に直接関わる利用者ならびに最終的に利用者に帰着する管理者のコスト」をもって消費者余剰を勘定する、ということになる。

本来、直接の利用者ではないものへの間接的な影響も考慮し、より一般的な意味での消費者余剰を勘案することが必要であるが、本研究ではいたずらに問題を複雑化せず、余剰勘案の必要性に焦点を当てるため、狭義の消費者余剰に限定して分析した。

2.3 本研究の位置づけ

社会資本は公共財であり、計画・評価の段階では費用便益分析により経済損失なども考慮した評価を考えているのに対し、維持管理の段階では社会的損失を考慮せず直接かかる維持補修費用しか LCC に計上しないのは長いライフサイクル期間においては矛盾しているといえる。ある場面では費用便益分析による評価を行い、別の場面では便益を考慮しないというのは統一性がないと考えられる。山口らの文献¹¹⁾では社会的損失を LCC に付加することが行われており、古田らの文献¹²⁾や杉本らの文献¹⁴⁾でも社会的損失を外部費用として LCC に加えて検討している。しかし、実際の維持管理機関が行っている維持管理計画での事業優先順位意思決定ではまだまだ社会的損失を考慮して行われているとはいえない。この理由は、社会的損失を費用として貨幣換算する際の指標としては、費用便益分析で用いられている貨幣評価原単位に準じればよいが、計算が煩雑になることや、条件設定によっては直接補修費用に比べて社会的損失が大きくなったり小さくなったりする場合もあるなど、LCC が変化し、本当にこれで意思決定してよいものかどうかという疑問が常につきまとうことである。しかし、最も大きな原因は、維持管理の段階において意思決定の指標となる LCC に社会的損失を含めるべきかどうかの合意形成がとれていないことに起因する。

本研究では、維持管理段階でも費用便益分析の考え方と整合性をとるべく、これまでの直接補修費用だけの LCC 最小化モデルから消費者余剰の概念を考慮した評価に移行することを考える。直接的補修費用に便益として社会的損失を加え、立案した最適補修計画が実用レベルでの意思決定に利用可能なことを示す。余剰の概念を導入することにより、事業優先順位や整備水準を実際に求めることができ、かつそれらを比較することで代替案評価をスムーズに行うことができることが狙いである。

3. 道路橋 RC 床版の劣化モデルと補修工法

3.1 RC 床版の健全度

RC 床版の健全度を評価する基準は、国や自治体、団体ごとに制定され、定期点検に利用されている。表-1 に橋梁定期点検要領（案）¹⁵⁾に示される対策区分の判定区分を載せる。なお、部材毎、損傷種類毎の損傷程度の評価区分は表-1 とは別に定められており、a,b,c,d,e の5つの区分で評価している。例えば、本論文で扱っている RC 床版のひび割れの場合、最大ひび割れ幅や最少ひび割れ間隔の大小で a,b,c,d,e を判定している。以降、健全度レベルとして、a,b,c,d,e で表記する。

表-1 対策区分の判定区分

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修等を行う必要がある。
E 1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E 2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

3.2 経年劣化モデル

実際の損傷劣化の進行は時間の経過とともに一様に進行するのではなく、ばらつきが存在する。本研究では図-1 に示すように、このような劣化進行の不確定性に対して損傷劣化のレベルを離散化し、確率的な取扱いをする。すなわち、ある損傷レベルにある構造物は、1年後に確定的に次の劣化損傷レベルに遷移するのではなく、ある確率に従って、現状を維持したり、より早く劣化したりといくつかの損傷劣化の状態推移を仮定する¹⁶⁾。

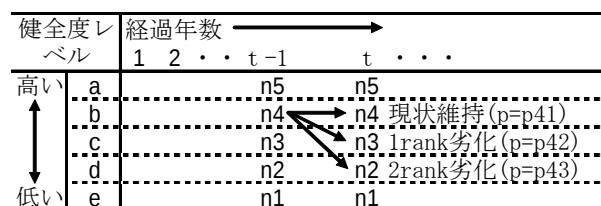


図-1 劣化進行の不確定性に関する概念図

供用開始 t 年後にある劣化損傷レベルの状態 $S(t)$ は一様マルコフ連鎖の概念から、式(1)で表せる。 $S(t)$ は状態ベクトルであり、構造物の状態を離散的で順序関係のある劣化状態分類で定義したものである。式(1)の状態遷移マトリクスに用いた分類に従うと、状態ベクトルは a,b,c,d,e の分類に対応した 5 つの要素から成る列ベクトルとなる。 M は $(t-1)$ 年の劣化損傷レベルから、 t 年後の劣化損傷レベルに移行する状態推移確率行列を表す。

$$S(t)=M \cdot S(t-1) \quad (1)$$

ここで,

$$S(t)=\begin{pmatrix} S(a,t) \\ S(b,t) \\ S(c,t) \\ S(d,t) \\ S(e,t) \end{pmatrix} \quad M=\begin{pmatrix} p55 & & & & \\ p54 & p44 & & & \\ p53 & p43 & p33 & & \\ p52 & p42 & p32 & p22 & \\ p51 & p41 & p31 & p21 & p11 \end{pmatrix}$$

である。

4. LCC モデル

4.1 LCC の定義

LCC は以下のように定義される¹⁷⁾。

$$LCC=I+M+R \quad (2)$$

ここに, LCC : ライフサイクルコスト

I : 初期コスト (計画・設計に関わる費用, 建設費用)

M : 維持管理コスト (点検費用, 各部材の補修・補強工事費)

R : 更新 (架替え) コスト (撤去費用, 取り替え費用)

一方, 海外の事例では, サンフランシスコのオークランドベイブリッジの改修と架け替えの比較検討が紹介されている¹⁸⁾。ここでは, 初期費用, 維持管理費の他に, 地震被災後の復旧費, リサイクルコスト, 物流遅延コスト, 交通事故による損失コストなどが含まれている。

ただし, 式(2)ではユーザーコストは考慮されていない。

本研究では, LCC を維持管理期間中に発生する補修・補強の費用に加えて, 消費者余剰を勘案する上で考慮すべきユーザーコストを考え, 式(3)の狭義の LCC を考える。

$$LCC=M+R+S \quad (3)$$

ここに, S は消費者余剰を勘案する上で考慮すべきユーザーコストである。

この式(3)では2.3 である M, R : 費用 (負の効用), S : 便益 (正の効用) という扱いであり, 全て貨幣価値に換算され, 金額ベースで評価されるという点で費用便益分析の考え方と整合している。

(1) 補修費用

損傷した RC 床版の耐力や耐久性を回復させる方法には, 補修工法, 補強工法, 床版の打ち換えなどがある。RC 床版に補修や補強を施す場合, 損傷の原因や状態にあった工法を選択しなければならない。補修や補強による効果は, 現状では不確定な部分も多いが, 補修や補強の工費も含めて設定した。補修費用は過去の補修実績から単位面積当たりで設定するが, この種の単価は損傷判定区分以外の要因も含まれていることもあるので注意を要する。本研究で使った単価は, 損傷判定区分の補

修以外の工種は含まれていないことを確認している。

(2) ユーザーコスト

橋梁は道路網の一部を形成し, 重要な役割を担う。そのため, 交通規制や通行止めを伴う工法が橋梁の補修・補強工事に適用された場合, 道路の利用者や近隣に住み日々橋梁を利用する人は, 目的地に到達するまでに余分な時間やガソリン代などを消費する。ここでは, これら利用者の負担を一定の換算係数で金銭に置き換える。これをユーザーコストと定義する。

(3) 割引現在価値

複数年にわたる補修計画を立案するため, 将来に発生する金銭の価値を現在の金銭価値に換算して評価する必要がある。

つまり, 価値の増加を利率 r で示すと, 現在の 1 万円の価値は将来 (1 年後) に $1 \text{ 万円} \times (1+r)$ となる。逆に将来得られる 1 万円の現在価値は, 割引率によって $1 \text{ 万円} \div (1+r)$ となる。

このように, 将来の費用支出については, その現在価値を評価し, 最小化を目指す必要がある。これを割引現在価値法と呼ぶ。割引現在価値法を取り入れた LCC の評価式は式(3)を用いて以下になる。

$$LCC=Md_i+Rd_i+Sd_i \quad (4)$$

ここに, d_i は i 年後の割引因子であり, 以下のようになる。

$$d_i = \frac{1}{(1+r)^i} \quad (5)$$

ここに, r は割引率である。現在割引価値においても, 総費用が少ない程経済的であるという判断には変わりはない。しかし, 割引率の与え方によって現在割引価値が異なることになる点には注意が必要である。

5. 最適化手法

本研究で取り上げる問題は非線形計画問題であり, かつ組み合わせ最適化を含むものである。このため限られたノードの数であっても, 計算規模は大きくなる傾向にある。Ouyang³⁾らは高速道路の舗装修繕を対象に, Branch and Bound やどん欲法を応用したアプローチを提案しているが, 施設の数が 3 の場合の計算例を示しているのみである。また, 厳密解法である Branch and Bound は計算規模が大きくなれば, 求解そのものが困難になり, 実用には不向きである。結果としてヒューリスティックな方法に頼らざるを得ない。どん欲法もその一つではあるが, 計算規模が大きくなった場合は, Branch and Bound ほどではないものの, やはり計算時間に関して長大化するという問題がある。ここでは計算時間が飛躍的に短く, かつ大規模計算に適用例が多い遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて求解することとした。

組み合わせ最適化問題の最適解をGAによって探索する。探索に必要なGAパラメータ、いわゆる個体数、交叉率、突然変異率を様々に変化させ、それらの最適な値を採用した。採用したGAパラメータの値は6.3で示す。

6. 数値計算結果と考察

6.1 道路ネットワーク

これまでに設定した方法の有用性を検証するため、図-2に示す限定された範囲内での道路ネットワークに点在する20橋の橋梁群を考える。

6.2 橋梁規模と状態推移、補修対策

橋梁には必ずRC床版が敷設されているものとし、RC床版の詳細を表-2に示す。

RC床版の劣化状態の推定には、表-3の状態推移マトリクス¹⁹⁾を使用する。

表-3に示すように、対策はRC床版の健全度レベルに応じて決まり、対策を行えば健全度レベルがaに戻るものとする。将来の時点におけるRC床版の健全度レベルは、平均値を切り下げた値を用いる。各健全度レベルにおける補修対策工法と補修単価を表-4に示す。

表-2 RC床版の面積と健全度レベル

橋梁	床版面積 (m ²)	健全度レベル	橋梁	床版面積 (m ²)	健全度レベル
1	2,000	b	11	1,000	b
2	3,000	a	12	1,200	a
3	2,000	c	13	1,100	c
4	2,000	a	14	900	a
5	1,000	d	15	500	d
6	3,000	b	16	1,000	b
7	1,000	a	17	500	a
8	400	e	18	400	e
9	500	c	19	1,300	c
10	3,000	b	20	1,000	b

表-3 状態推移マトリクス¹⁹⁾

	a	b	c	d	e
a	0.74564	0.25436	0	0	0
b	0	0.49186	0.50814	0	0
c	0	0	0.9047	0.0953	0
d	0	0	0	0.99	0.01
e	0	0	0	0	1

表-4 健全度レベルと対策

健全度レベル	対策	工費(千円 /m ²)	通行止め(日)
a	なし	0	0
b	①表面被膜工	13	0
c	②ひび割れ注入工	35	0
d	③鋼板接着工	80	7
e	④床版打換え工	350	30

6.3 ユーザーコスト

本研究で用いた交通量と速度を表すQ-V式を図-3に示す。ネットワークの交通量と交通時間は、容量制限付分割配分法(実際配分)で算出する。これは、OD表のOD交通量を分割し、最短経路探索を行い、分割したOD交通量を各リンクに配分し、次に、容量制限式(Q-V式)により速度を修正し、再び最短経路探索を行うといったプロセスを分割回数だけ繰り返す方法である。なお、最短経路探索にはDFSを用い、分割回数は100分割で行った。分割配分法は地方整備局で実際に使われている。

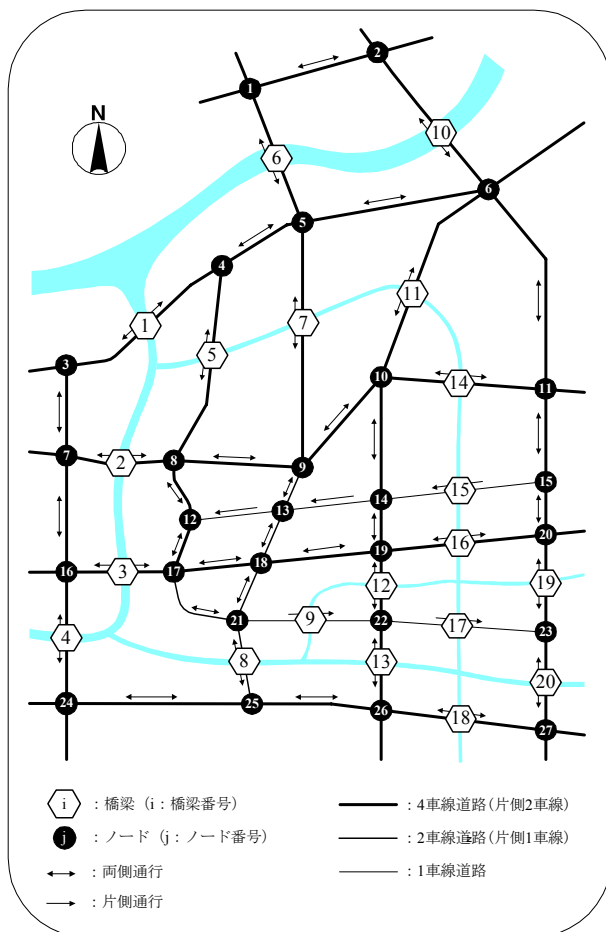


図-2 補修計画範囲

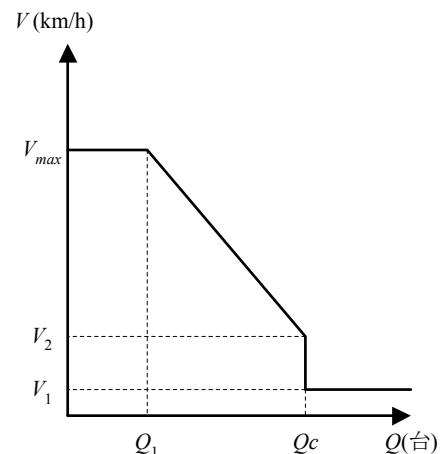


図-3 Q-V式

各リンクの可能交通容量 Q_c と自由走行速度 V_{max} は、2車線の場合、それぞれ36,000台/日、50km/h、1車線の場合、それぞれ12,000台/日、40km/hのように仮定した。

交通量の基点と終点を表すOD表を表-5に示す。また、ネットワークの要素交通量と交通時間の算出には、分割配分法を用いている。また、「大型車の混入率」はリンクごとに与えるべきであるが、本研究では一定としている。

時間価値は、表-6に示す費用便益分析マニュアルの車種別時間価値原単位を元に、乗用車と普通貨物車の混入率をそれぞれ90%と10%として算出した。

ユーザーコストは、対策による通行止めの期間 D に発生し、ネットワーク全体の通行止め時の時間コスト S_w と通常時の時間コスト S_o の差で表されるものと仮定した。リンクごとの時間コストは、時間価値 α と交通量 Q 、交通時間 T の積で、次式により表される。

$$S = D \cdot (S_w - S_o)$$

$$= D \cdot \left(\sum_{l=1}^N [\alpha \cdot Q_{wl} \cdot T_{wl}] - \sum_{l=1}^N [\alpha \cdot Q_{ol} \cdot T_{ol}] \right) \quad (6)$$

ここで、 N はネットワークのリンク総数である。

なお、採用したGAのパラメータは、個体数が100、交叉率が0.6、突然変異率が0.01である。

表-5 OD表

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	3000	2000	500	500	2000	500	500	2000	1500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
2	3000	0	2000	500	500	2000	500	500	2000	1500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
3	2000	500	0	500	500	2000	1000	1000	1500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
4	500	500	500	0	500	500	500	500	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
5	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
6	2000	2000	500	500	0	2000	2500	1500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
7	500	500	1000	500	500	2000	0	1500	500	500	1000	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
8	2000	2000	1000	2000	500	2500	1500	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
9	1500	1500	1000	1000	500	1500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
10	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	1000	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
11	1000	500	500	500	500	500	1000	500	500	1000	0	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
12	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
13	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
14	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	3000
15	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	3000
16	500	500	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	3000
17	500	500	500	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	3000
18	1000	1000	1000	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500	1000	3000
19	500	500	500	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	2000	500	500	500	500	500	1000	3000
20	1000	1000	1000	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	2000	0	500	500	500	500	500	1000	3000
21	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	1000	3000
22	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	1000	500	500	1000	3000
23	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1000	0	500	500	1000	3000
24	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	1000	3000
25	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	500	1000
26	1000	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	1000
27	3000	3000	2000	500	500	2000	500	500	2000	1500	500	500	500	500	500	500	500	1000	500	1000	500	500	500	500	500	1000	0

表-6 車種別時間価値原単位

車種	時間価値原単位 (円/分・台)
乗用車	62.86
バス	519.74
乗用車類	72.45
小型貨物車	56.81
普通貨物車	87.44

6.4 目的関数

便益を最大化することは、LCC最小化することと同意であると考え、LCC最小化を目的関数とした。また、LCCは、RC床版の対策費用と通行止めにより発生するユーザーコストの合計とした。割引率は4%、対策計画期間は20年とした。

社会的割引率の設定については、総務省のWeb Pageより、日本の公共投資共通で4.0%を使うということが明記されている²⁰⁾。また、「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」(国土交通省、2004.2.)でも社会的割引率を4%と定めている。この社会的割引率の設定については、(a)資本の機会費用による設定と(b)社会的時間選好による設定とが考えられるが、実務的に(b)で設定することは困難であるので、課題はあるものの(a)の考え方に基づいて市場金利を参考にして社会的割引率を決定している²⁰⁾。しかし、この値を何%にするかで結果が大きく異なるので、社会的割引率の設定方法は費用便益分析手法高度化における主要検討課題の一つになっている。

6.5 計算条件

以下の3ケースで計算を行った。

- ①健全度レベルがc以上の計画面案
- ②健全度レベルがd以上の計画面案
- ③予算制約のある健全度レベルがc以上の最適化した計画面案

6.6 数値解析結果と考察

(1) 健全度レベルがc以上の計画面案

表-3の劣化モデルを用いて、今後20年にわたる健全度レベルの推移を算定すると、表-7のようになる。

健全度レベルaの橋梁の劣化推移では、1年後に健全度レベルがaからbに、4年後に健全度レベルがbからcに、9年後に健全度レベルがcからdに移行している。したがって、健全度レベルaの橋梁は、4年ごとに補修を行う場合はつねにレベルbを保ち、9年ごとに補修を行えばつねにレベルcを保つことができる。

表-7 劣化の推移

健全度	0年後	1年後	2年後	3年後	4年後	5年後	6年後
a	5	4.746	4.427	4.113	3.831	3.586	3.377
b	4	3.492	3.194	3.002	2.868	2.765	2.68
c	3	2.905	2.818	2.738	2.665	2.597	2.536
d	2	1.99	1.98	1.97	1.961	1.951	1.941
e	1	1	1	1	1	1	1
健全度	7年後	8年後	9年後	10年後	11年後	12年後	13年後
a	3.2	3.049	2.92	2.809	2.713	2.628	2.554
b	2.607	2.542	2.484	2.43	2.382	2.337	2.296
c	2.479	2.427	2.379	2.335	2.294	2.256	2.221
d	1.932	1.923	1.914	1.904	1.895	1.886	1.878
e	1	1	1	1	1	1	1
健全度	14年後	15年後	16年後	17年後	18年後	19年後	
a	2.489	2.43	2.377	2.329	2.286	2.246	
b	2.257	2.222	2.189	2.159	2.13	2.104	
c	2.188	2.157	2.129	2.103	2.078	2.055	
d	1.869	1.86	1.851	1.843	1.835	1.826	
e	1	1	1	1	1	1	

健全度レベルbの橋梁の劣化推移では、1年後に健全度レベルbからcに、4年後にレベルがcからdに移行

図-2 のような閉じたネットワーク環境のもとで、各橋梁に通行止めが必要な対策を行った場合、一日あたりのユーザーコストは表-8 のようになる。通行止めを同時期に行うことでユーザーコストが増大する可能性も考えられるが、通行止め期間が最大 30 日であることから、仮に通行止めが同じ年度で複数回発生した場合でも、365 日の間で工事時期をずらせば対応は可能であると考えた。

橋梁	ユーザーコスト	橋梁	ユーザーコスト
1	14,871,904	11	8,863,646
2	15,133,906	12	91,357,026
3	20,654,684	13	41,476,703
4	105,376,192	14	8,341,561
5	8,086,676	15	921,413
6	136,290,550	16	21,720,048
7	1,351,996	17	647,626
8	9,130,090	18	53,607,706
9	2,302,527	19	133,011,418
10	88,022,119	20	30,585,325

表-9 は、健全度レベル c 以上の計画案を作成したものである。補修工費が 18.3 億円、ユーザーコストが 19.5 億円、LCC が 37.8 億円、一年当たりの LCC が 1.9 億円となる。健全度レベルが c 以下の橋梁 3, 5, 8, 9, 13, 15, 18, 19 は、対策を行わないと次年度に健全度レベルが d 以下となるため、初年度に対策する必要がある。それ以外は、レベルが d になる前にひび割れ注入工で対策をしている。4 年目と 13 年目の計画は同じなのに、13 年目のほうが安くなっている理由は、将来の工費が 4 % の割引率で現在価値に割引かれているためである。

棟家	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	②	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
3	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
5	③	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
6	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—
8	④	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
9	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
10	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—
13	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	③	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
16	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—
18	④	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
19	—	—	—	②	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—
工費(億円)	5.7	0	0	3.4	0	0	0	0	2.2	1.8	0	0	2.4	0	0	0	0	1.5	1.2	

補修工費	18.3 (億円)
ユーザーコスト	19.5 (億円)
LCO	37.8 (億円)
一年当たりのLOG	1.9 (億円)

注: ①表面被膜工, ②ひび割れ注入工, ③鋼板接着工, ④床板打替工

健全度レベル a, b, c の劣化推移では、20 年以内に健全度レベル d に移行していない。そのため、健全度レベル d 以上の計画では、健全度レベルが d と e の橋梁に対策しておけば、それ以上対策する必要がないことになる。

年度\年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	③	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	④	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	③	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	④	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
工費(億円)	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

補修工費	40 (億円)
ユーザコスト	195 (億円)
LCC	235 (億円)
一年当たりのLCC	1.2 (億円)

注: ①表面被膜工、②ひび割れ注入工、③鋼板接着工、④床板打替工

上記の二つの計画案は、潤沢な予算がある場合にできる計画である。しかし現実には、年度予算の制約があるので、決められた年度予算で最適な計画を立案する必要がある。

この場合、以下の三つの問題がある。

①健全度レベルを下回ったままの橋梁が存在する。

LCC が大きくなる維持管理方法が提案されてしまう場合がある。

③大規模ネットワークでは組み合わせ問題の規模が大きくなり過ぎ、厳密な最適化ができない。

①は、例えば表－9において、初年度に対策をする必要がある8橋のうち、2橋しか対策ができない場合、残りの6橋の健全度レベルは翌年下回ったままになるために起こる。このような状態が常時起こりうることになる。

②は、対策が遅れることで、LCCの大きい対策をせざるを得ないために起こる。例えば、橋梁5は健全度レベルがdなので、初年度に鋼板接着工を対策した場合、補修工費が8,000万円、ユーザーコストが5,700万円になる。しかし、翌年に対策した場合には、床版打替工の対策をする必要があり、補修工費が3.4億円、ユーザーコストが2.3億円となり、約4.2倍のコストがかかることになる。現実には、予算を越えるような場合には、数年に分けて対策することになる。

③は、対策計画は、いつどの橋梁に対策をすればよいかという組み合わせ問題になるので、橋梁数や年数が大きくなると組み合わせの爆発が起きてしまうことである。本研究では、20橋梁に対して20年の対策計画を立てるので、2の(20×20)乗、すなわち2.58E+120の計画が存在することになる。すべての計画を計算して、便益が最大となる最適な計画を策定することは不可能といえる。

表－11は健全度レベルがc以上で年度予算が1.5億円の場合に、GAで最適化した計画案である。補修工費が18.1億円、ユーザーコストが26.6億円、LCCが44.7億円、一年当たりのLCCが2.2億円となる。表－8の結果と比べて、補修工費が0.2億円減少し、ユーザーコストが7.1億円増大して、LCCが6.9億円増大している。対策が遅れることにより、LCCが大きくなっている。補修工費が減少した理由は、表面被膜工とひび割れ注工を上手く組み合わせることで、計画期間にわたって健全度レベルcを下回らないように最適化しているためである。この計画では、橋梁8、9、11、15、18、19は、数年の間、健全度レベルcを下回っている。本来、健全度レベルcを下回る前に補修を完了するという制約条件を付加するべきであるが、仮にこのような制約条件を追加したとしても、予算制約をクリアできない場合はやはり渋滞が発生することになるので、必ずしも定式化は必要ないと考えた。あるいは「健全度レベルcを下回る前に補修を完了する」という条件を付加すれば解がない可能性もある。健全度レベルeの橋梁8が最長で10年下回っている。この理由は、予算が足りないこと、健全度レベルがdやeでもユーザーコストに影響しないこと、後で対策すると割引率の関係でユーザーコストが低く

見積もられるためである。予算以外の問題は健全度レベルがdやeの場合にはユーザーコストの発生を先送りすることで、解消されることが示唆されている。

表－11 健全度レベルがc以上で年度予算を1.5億円の最適化した計画案

橋梁\年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	③	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
5	③	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	④	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	③	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	—	③	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—
13	②	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	①	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—
15	—	—	—	—	—	④	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	②	—	—	①	—	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	④	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
19	—	③	—	—	—	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	②	—	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
工費(億円)	1.4	1.3	1.5	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	1.3	1.3	0.8	1.1	1.1	0.5	0	0	0	0.5	0	0
補修工費	18.1 (億円)																			
ユーザーコスト	26.6 (億円)																			
LCC	44.7 (億円)																			
一年当たりのLCC	2.2 (億円)																			

注:①表面被膜工、②ひび割れ注工、③鋼板接着工、④床版打替工

(4) 消費者余剰の概念を考慮した評価

ここでは、消費者余剰の概念を考慮した評価を行うために、直接補修費用のみで最適化した計画案(ベンチマーク)と直接補修費用にユーザーコストを勘案した計画案を比較することで、消費者余剰の概念を考慮した評価の方が望ましいことを示す。

健全度レベルがc以上で、年度予算が1.5億円の場合に、直接補修費用だけを目的関数にしてGAで最適化した計画案を表－12に示す。

表－12 健全度レベルがc以上で、年度予算が1.5億円の最適化した計画案(直接補修費用だけを考慮)

橋梁\年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	②	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	③	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	②	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	①	—
5	③	—	—	—	①	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	③	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	④	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	③	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	②	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	—	—	—	②	—	—	—	—	—	②	—	—	—	—	—	—	—	—	②	—
12	—	—	—	①	—	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	—	—	—	—	③	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	②	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—
15	③	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	②	—	—	①	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	④	—	—	—	①	—	—	—	①	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	—	—	—	③	—	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—
20	—	—	②	—	—	—	—	—	①	—	—	—	—	—	—	—	②	—	—	—
工費(億円)	1.5	1.3	1.5	1.5	1.4	0.8	1.4	1.4	1.2	1	0.6	0.3	1.2	0.1	1.5	0.3	0.1	0.2	0	0
補修工費	17.3 (億円)																			
ユーザーコスト	34.4 (億円)																			
LCC	51.7 (億円)																			
一年当たりのLCC	2.6 (億円)																			

注:①表面被膜工、②ひび割れ注工、③鋼板接着工、④床版打替工

表－11と表－12とを比較すると、直接補修費用のみで最適化した計画案は補修費用だけの最適化なので費用が減少する。その結果、ユーザーコストが大きく増大して、結果、LCCも増大する。原因は、対策遅れによるユーザーコストの発生で、橋梁6、13は新たにユーザーコストがでている。本来、必要な健全度レベルに達する前に補修を完了するという制約条件を付加するべきであるが、仮にこのような制約条件を追加したとしても、予算制約をクリアできない場合はやはり渋滞が発生す

ることになるので、必ずしも定式化は必要ないと考えた。あるいは必要な健全度レベルに達する前に補修を完了するという条件を付加すれば解がない可能性もある。

このように、消費者余剰の概念を考慮した評価を行うとベンチマークに比べて LCC は少なくてすむことが確認できる。したがって、消費者余剰という概念を考慮した方が、計画から維持管理まで一貫した事業評価が可能（費用便益分析との整合性）となり、直接補修費用だけの最適化計画案よりも利用者が負担すべき出費が減少する。

(5) まとめ

ここでは、ネットワーク上に点在する 20 橋梁に対して、3 種類の LCC 最小となる計画を立てることを試みた。

一つ目は健全度レベル c 以上を保つ計画、二つ目は健全度レベル d 以上を保つ計画、三つ目は健全度レベル c 以上で年度予算 1.5 億円の計画である。

これらの計画から分かることは、どの計画も LCC に対してユーザーコストが大きいことである。したがって、ユーザーコストが少なくなるように計画することが重要になる。

一つ目と二つ目の計画を比較すると、二つ目のほうが健全度レベルの低い状態を許しているために、LCC が小さくなった。しかし、健全度レベルが低いと交通容量を含む走行性能が下がるため、ここでは考慮されていないユーザーコストが発生する可能性がある。したがって、どのような健全度レベルを保つべきか議論する前に、健全度レベルと走行性能の関係を明らかにする必要がある。

三つ目の計画は、予算の制約があるために、単純な計算では計画できない。ここでは組み合わせ最適化手法の一つである GA を使って計画した。GA は、最適解を保証しないが、短時間で良い解を得ることができるため採用している。一つ目の計画も健全度レベルが c 以上の計画なので比較すると、LCC が大きくなっていることが分かる。原因は、予算の制約により対策が遅れて、工費やユーザーコストが多くかかる対策をせざるを得なかったためである。仮に、すべての橋梁の健全度レベルが a の状態で計画を立てられるのであれば、理想に近い計画が立てられ、予算制約による LCC の増大は非常に小さいものになる。したがって、健全度レベルが大きく下がってしまう前に、早期に対策を立てておくことが、LCC 最小化の点では望ましいと言える。

ただし、今回用いた橋梁と交通データは、都市部の橋梁ネットワークを想定して作成したデータであるため、劣化や交通の特性が全く違う地域では、異なる結論に至る可能性があることは否定できない。さらなる検討が必要であろう。

このように、一つ目と三つ目を比較することに大きな意味がある。一つ目（二つ目も本質的に同じ）は予算制約など、LCC を管理する上で常に有効になる制約条件があるという設定での結果で、ある意味非常に恵まれた環境のもとで理想的に管理できた場合の評価という意味になる。三つ目は逆に厳しい条件下での問題設定で、より現実的な形になっている。特に予算制約の結果、健全度を維持できないというのは現実的に十分あり得ることで、そのため、前もって予算を確保し、事前修繕を行うべきという展開につながる。表-11 の結果が予防修繕あるいは予防的予算措置の可能性を示しているといえる。一つ目の状態に持って行くことが社会的に望ましいと言うことを合意形成として図っていく必要がある。

7. おわりに

道路ネットワーク上の橋梁群を構成する構造要素の中でも損傷の著しい RC 床版を対象に、限られた予算内で効率的かつ合理的に補修すべき RC 床版、補修順序、最適な補修補強の工法、最適な補修時期が推奨できる橋梁の維持管理計画を立案した。意思決定の指標には補修工費とユーザーコストを合計した LCC を採用した。本維持管理計画の特徴は、次のようである。

- 1) RC 床版の経年劣化を状態推移マトリクスで表した。
- 2) 補修計画案に対して、補修や補強にかかる工費とユーザーコストを算出し、計画段階で導入されてきた費用便益分析における効用・費用・便益と整合性のある形で LCC を評価した。
- 3) 組み合わせ最適化問題に対して遺伝的アルゴリズムを適用し、求解した。
- 4) 消費者余剰の概念を導入した LCC を用いて、予算制約の条件がある場合のマネジメント戦略が立案できることを示した。計算例では、直接整備費のみ勘案した場合では消費者余剰が減少することが示され、システム全体では非効率的であり、消費者余剰全体で最適化する必要があることが示された。

今後の課題は以下のとおりである。

- 1) 自治体が管理する橋梁は橋長 15m 以上でも平均 800 橋規模と多く、さらに複雑な道路ネットワークでの適用性の検証を行う必要がある。
- 2) ユーザーコスト以外の社会的損失、例えば、環境コスト（騒音、CO² 排出など）や交通事故損失、物流遅延コストなどを LCC に組み入れることの検討と合意形成を進める必要がある。
- 3) 自治体はほとんどの場合で予算制約が発生する。しかも、補修費用には使用上の制約がかなりある。現行の法制度を変えない限り、利用者が被る負担（消費者余剰）は増大する可能性が高いといえる。このため、本研究で示した事前補修を前提とした方策を実施する

には、公共が直接管理運営することから、民間委託に移行することが必要であると思われる。民間委託の方式も様々な考えられるが、契約方式に自由度が比較的高い PPP (Public Private Partnership) の導入が考えられる。今後、効率的かつ効果的に維持管理を進めていく上で、PPP への移行の議論は是非必要と考える。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路統計年報 2005, 2005.8.
- 2) 西川知廣：社会資本の維持管理, 土木学会誌, Vol.83, No.2, pp.35-37, 1998.2.
- 3) Ouyang, Y., Madanat, S.: Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, Transportation Research 38A, 347-365, 2004.
- 4) 北田俊行, 関 惟忠, 松倉孝夫, 西岡敬治, 岩崎一好, 矢野幸子：都市高速道路網における鋼橋のトータルコストに関する一試算, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.897-906, 1995.3.
- 5) 貝戸清之, 阿部 允, 公門和樹, 藤野陽三：ストック効果を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネージメント, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.991-998, 2001.3.
- 6) 仁木京子, 今野将顕, 宮本文穂, 中村秀明, 石田純一：BMS における維持管理対策の優先順位決定方法の提案, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.367-378, 2005.3.
- 7) 近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則：ウイルス進化型 GA を援用した橋梁補修計画支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.211-218, 2001.3.
- 8) Friesz, T.L. and Fernandez, J.E.: A Model of Optimal Transport Maintenance with Demand Responsiveness, Transportation Research, Vol. 13B, 317-339, 1979.
- 9) Friesz, T.L. and Fernandez, J.E.: Influence of Demand-Quality Interrelationship on Optimal Policies for Stage Construction of Transportation Facilities, Transportation Science, Vol. 15, No.1, 16-31, 1981.
- 10) de Palma, A., Kilani, M., Lindsey, R. : Maintenance, service quality and congestion pricing with competing roads, Transportation Research 41B, 573-591, 2007.
- 11) 山口亮太, 伊藤裕一, 三木千壽, 市川篤司：社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.983-989, 2001.3.
- 12) 古田均, 築山勲, 堂垣正博：道路橋 RC 床版のライフサイクルコスト分析による最適維持管理計画, JCOSSAR2000 論文集, 82-A, pp.497-504, 2000-11.
- 13) 築山勲, 古田均, 堂垣正博：道路橋の維持管理計画支援システムへのウイルス進化型 GA の適用, 土木学会, 第7回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.7-12, 2001-12.
- 14) 杉本博之, 首藤諭, 後藤晃, 渡辺忠朋, 田村亨：北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について, 土木学会論文集, No.682/I -56, pp.347-357, 2001.7.
- 15) 国土交通省 国道・防災課：橋梁定期点検要領 (案), 2004.3.
- 16) 水谷 守, 足立幸郎, 小塚幹夫：経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究, JCOSSAR'95 論文集, pp.341-348, 1995.
- 17) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No.501/-29, pp.1-10, 1994.10.
- 18) 横山正樹, 齋藤展生, 大村 修, 続石孝之：道路橋におけるライフサイクルコストの考え方と米国の事例, 第1回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集, pp.9-16, 1999.7.
- 19) 保田敬一, 小林潔司：BMS における点検結果と状態推移確率が LCC に及ぼす影響, 土木学会, 建設マネジメント研究論文集, Vol.11, pp.111-122, 2004-12.
- 20) <http://www5.cao.go.jp/seikatsu/koukyou/data/sankoshiryo1-161201.pdf>

(2007 年 9 月 18 日受付)