

サービス効果を考慮した橋梁の補修順位決定法に関する研究

Study on decision method of bridge maintenance rank considering service effect

三上修一*, 高田直幸**, 高橋清*, 大島俊之***, 向井隆行****

Shuichi Mikami, Naoyuki Takada, Kiyoshi Takahashi, Toshiyuki Oshima, Takayuki Mukai

*博(工), 北見工業大学准教授, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

**修(工), 株式会社ズコーシャ (〒080-0048 北海道帯広市西 18 条北 1 丁目 17 番地)

***工博, 北見工業大学教授, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

****北見工業大学大学院, 工学研究科土木開発工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

The contribution of the highway network to physical distribution service is very large. In this paper, the repair ranking determination of a bridge is determined using the asset value of a bridge, the parameter of user cost, and the parameter quantitatively evaluated in physical distribution service. In case where it performs comprehensive evaluation in consideration of two or more parameters, it is important to decide the weight of this parameter nothing arbitrariness. Then bridge maintenance rank by using the parameters considering the weighted asset and social value and Data Envelopment Analysis (DEA) is dealt with in this paper. Moreover, the validity of these methods is verified by using the actual bridge data. As a result, if bridge health index is keeping high level but social value is high quality, preventive maintenance is suggested.

Key Words: service effect, maintenance priority index, Data Envelopment Analysis (DEA), preventive maintenance

キーワード: サービス効果, 補修優先度指数, 包絡分析法, 予防保全

1. まえがき

橋梁構造物の老朽化および公共投資の縮減に伴い、橋梁維持管理システム (Bridge Management System, BMS) に関する研究が数多く報告されてきた。特に近年では、地震等の災害時におけるユーザーコストを考慮したライフサイクル評価に関する研究が活発に行われ^{2)6),12),13)}、道路利用者の視点がより重視されるようになってきた。また、維持管理の対象も単一橋梁からネットワークレベルに拡張されてきた⁵⁾¹¹⁾。その中で著者らは、橋梁の資産的評価および資産価値に着目した橋梁健全度指数について提案してきた¹⁴⁾。これらは経済的視点から評価したものであり、ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, LCC) の観点からも重要な指標である。

一方、我国におけるサービス産業は著しく発達している^{15),16)}。サービスにも様々あるが、本研究で対象とする橋梁を含めた道路ネットワークの貢献度から言えば、物流は大きなウェイトを占めている。国内貨物の輸送機関別分担率 (トンキロベース) では、1994 年時点で 50% 以上がトラック輸送に依存している¹⁷⁾。近年では、トラックの労働力不足、道路混雑、地球温暖化・環境問題、エネルギー問題等からモーダルシフト政策が推進され、鉄

道等の大量輸送機関に移行する動きも見られるが、トラック輸送は相変わらず伸び続けている¹⁸⁾。したがって道路ネットワークに属する橋梁群の健全化は、地域経済に大きく影響するものと考えられる。そこで本研究では、これまでに評価した橋梁の資産価値およびユーザーコストに加えて、物流サービスを定量的に評価し、橋梁の補修順位決定に反映させる内容について検討する。また、このような検討により、物理的健全度が高くても地域経済における橋梁の貢献度が高ければ、予防保全による維持管理の必要性を示すことも可能となる。

しかし、複数の異なるパラメータを考慮した総合評価において各パラメータ間の重み付けが問題であり¹⁹⁾、一般に恣意性が生じる。同類の研究として小幡らは、複数のパラメータを考慮した補修橋梁選定における包絡分析法 (Data Envelopment Analysis, DEA) の適用性について基礎的検討を試みている^{12),13)}。本研究では、各パラメータ間の重み付けに主眼を置き、定式化した補修優先度指数および DEA 解析の両手法により北海道内国道橋の補修順位付けを試みた。また、これまで蓄積されてきた補修実績データを用いて本研究で検討した補修順位決定における評価項目の妥当性を検証し、最後に実用化へ向けた考察を述べる。

2. 橋梁の資産的評価¹⁴⁾

2.1 資産価値の評価法

橋梁全体における資産価値の評価法については文献¹⁴⁾に示しているが、ここではその概要について述べる。橋梁の資産的評価は通常の建築物の評価法と同様に考えれば、建設時の初期コストから減価償却を考慮するとともに、構造的な劣化度を評価して総合的に残存する資産価値が算出される。しかし、このような手法によれば、減価償却の評価精度、割引率の適正化等、検討すべき課題が多い。したがって本研究では、現時点で同様の機能を有する橋梁を再建設する場合に要する経費として計算する。これは再調達価格、または初期資産（建設費）と称され、全ての部材が健全な状態（建設当初）の橋梁全体の建設費と同義である。そして、次節で述べる劣化度を資産価値の低下率と見なして初期資産（建設費）を割引した現時点の資産価値を評価し、これを現在資産（建設費）と称する。このような評価法によれば、橋梁各部材の現在における実務レベルの建設単価、構造諸元および点検結果を用い、経年的に評価値の更新が必要である。

2.2 資産劣化の考え方

本研究では、表-1に示すように橋梁各部材の点検データ²⁰⁾に基づく5段階の損傷度ランクから資産価値の低下率を設定している。すなわち、橋梁の資産価値では各部材の損傷度に応じて比例的に変化する損傷係数を用いて損傷状態を評価する。この手法の妥当性には検討の余地があるが、現時点でこれに代わる手法はなく、Pontis²¹⁾等においても同様の手法が用いられている。なお、表-1に損傷度ランクIが示されていないが、これは橋梁点検において早急に調査および補修・補強すべき損傷状態であるため、実際の点検データには反映されない。

表-1 各部材の資産価値の低下率

部材の損傷度	損傷係数
II	0.75
III	0.50
IV	0.25
OK	0.00

2.3 橋梁健全度指数

これまで著者らは、橋梁の健全性を定量的に評価する手法として、エキスパートにより示された各部材の橋梁全体に占める重み係数に基づく重み付き総合評価式を用いた総合健全度²²⁾、および前述した資産価値に基づき、以下のように定義される橋梁健全度指数（Bridge Health Index, BHI）¹⁴⁾を提案してきた。

$$BHI = \frac{\text{現在資産（建設費）}}{\text{初期資産（建設費）}} \times 100 \quad (1)$$

本研究では、後者の橋梁健全度指数（BHI）を採用す

るが、これは Pontis²¹⁾等においても用いられている手法であり、橋梁点検データによる各部材の物理的劣化度に対して、経済的資産価値の大きさが橋梁全体の重み係数として橋梁健全度指数（BHI）に反映される。

3. 橋梁の社会的評価

3.1 迂回による社会的損失

道路ネットワークに属する橋梁群が被害を受けて通行不能となった場合、道路利用者が迂回することにより社会的損失（ユーザーコスト）が発生する。ユーザーコストは、対象の社会基盤が災害、事故、あるいは補強工事等により使用できなくなった場合に利用者が被る被害と定義され、迂回による時間的損失、物品の痛み等の経済的損失、交通事故の増加、周辺地域の環境劣化等が含まれる。杉本らは、迂回による時間的損失を求めてユーザーコストを定量化し、橋梁の耐震設計におけるLCC計算に応用している²⁾。山口らは、走行時間、走行費用、交通事故、環境（大気汚染、騒音、地球温暖化）等に関する社会的損失を評価し、これらを含めたLCCを試算している³⁾。また、地震リスクを考慮したLCC評価においてユーザーコストが多大な影響を与えることも報告されている⁵⁾⁶⁾。そこで本研究では、北海道内国道橋を対象に走行時間および走行費用の損失について評価し、これらを迂回により顕在化する橋梁の存在価値と捉えて後述の補修順位決定に反映させることを目的とする。以降、計算過程を順に説明する。

(1) 迂回路の選定

まず始めに、橋梁の位置を確認し、当該する橋梁周辺の迂回路を選定する。対象橋梁の位置は北海道開発局の道路現況図を用いて確認し、電子地図²³⁾を用いて迂回路を選定する。ここで言う迂回路とは、対象橋梁が通行不能となった場合に通常路と同等の役割を果たす経路を指している。本研究では、国道橋を対象としているため、交通容量、物質輸送等の観点から迂回路にも幹線的役割が求められる。そこで迂回路の選定に当たり、国道・道道において迂回路の距離が50km以内、且つ通常路の距離が2倍以下の路線であることを第一条件とし、この条件で選定されない場合に限り市町村道・農道も対象路線に含め、距離制限は設けないこととした。なお、複数の迂回路が存在する場合は最短経路を選定した。

(2) 走行経費の算定

ここでは費用便益分析マニュアル²⁵⁾に基づき、以上で選定された通常路および迂回路における走行経費を算定する。走行経費は、当該する路線区間を走行した際にユーザーが負担する経費のことであり、走行時間費用（時間価値に走行時間を乗じた費用）と走行費用（燃料費、オイル費、タイヤ・チューブ費、車両整備費、車両償却費等）を考慮している。通常路に流れる交通量は、道路交通センサス²⁶⁾に基づき、対象橋梁を含む交通観測地点

の断面交通量を用いた。迂回路に流れる交通量に関して杉本らは、分割配分法を用いて迂回路に流入する交通量を計算しているが²⁾、ここでは通常路の交通量が全て迂回路に流入するものと仮定した。

$$C = CT + CR \quad (2)$$

$$CT = \sum_i \sum_j \sum_k (Q_{ij} \times L_i \times a_j \times 60/V_k) \quad (3)$$

$$CR = \sum_i \sum_j \sum_l (Q_{ij} \times S_l \times b_j) \quad (4)$$

ただし、

C：走行経費（円／日）

CT：走行時間費用（円／日）

CR：走行費用（円／日）

Q_{ij} ：交通観測地点別車種別交通量（台／日）

L_i ：交通観測地点別路線延長（km）

a_j ：車種別時間価値原単位（円／分・台）

V_k ：平日または休日の混雑時平均旅行速度（km／時）

S_l ：沿道状況別延長（km）

b_j ：車種別走行経費原単位（円／台・km）

i ：交通観測地点

j ：車種（乗用車，バス，小型貨物車，普通貨物車）

k ：平日または休日

l ：沿道状況（DID・その他の市街地，平地，山地）

なお、迂回路における走行経費の算定において一部で交通データの不足を補うため、以下の仮定を設けた。

- ① 道道の混雑時平均旅行速度は、平日・休日を同値とする。
- ② 市町村道の混雑時平均旅行速度は、通常路より 10（km／時）低い値とする。

(3) 迂回による走行経費の損失

ユーザーコストを LCC 評価に導入する場合、被害規模に応じて復旧日数（工期）を設定しているが²⁾⁶⁾、ここでは具体的なシナリオについては想定しておらず、便宜的に年間費用に換算した。走行時間費用に関しては、平日・休日における混雑時平均旅行速度の差異が考慮されており、曜日割合から平日 245 日、休日 120 日として年間費用に換算した。また、上記の算定式では当該する交通観測地点における路線延長で計算されているが、実際には単位 km 当り走行経費に換算後、通常路および迂回路の距離を乗じて計算する。そして、通常路および迂回路における走行経費の差分を損失走行経費として算定する。

$$\Delta C = C_d - C_u \quad (5)$$

ただし、

ΔC ：損失走行経費（円／年）

C_u ：通常路走行経費（円／年）

C_d ：迂回路走行経費（円／年）

(4) 算定結果

これまでに北海道内国道橋 2030 橋の計算が終わっており、表-2 では開発建設部毎に損失走行経費の代表値を示している。特に建設部 C に属する橋梁群は、迂回による社会的損失が大きくなる傾向にあり、単純に最大値と比較すれば建設部 G より約 10 倍程度大きい。これは近隣で迂回路が取り辛い地形が影響しているものと考えられ、平均的にも他の建設部より大きな値を示している。

他に特筆すべき点として、175 橋で損失走行経費がマイナスとなったことが挙げられる。これらは迂回による社会的損失が発生しないものと見なし、損失走行経費は 0 とした。この主な要因としては、通常路より迂回路の走行距離が短くなることが考えられる。しかし、そのような場合でも走行距離の短縮度合いが小さければ、迂回路の走行速度が低下することで迂回路走行経費が高まり、損失走行経費がプラスに転じることもあった。また、通常路より迂回路の走行距離が長くなる場合でも迂回路の走行速度が高く、走行距離の増加度合いが小さければ、損失が発生しないこともあった。

表-2 損失走行経費（2030 橋）の代表値

建設部	橋梁数	平均値 (円／年)	最大値 (円／年)
A	291	3,642,485,348	51,665,749,055
B	165	4,855,049,872	38,982,217,011
C	266	5,117,655,093	83,870,634,734
D	298	3,742,336,116	21,501,240,105
E	195	4,176,559,556	47,299,956,884
F	87	1,557,527,490	13,121,672,456
G	69	1,348,440,241	8,984,902,848
H	224	3,099,265,359	16,415,984,843
I	229	1,578,354,857	11,295,284,746
J	206	3,718,166,337	32,508,235,470

3.2 地域経済における橋梁のサービス効果

橋梁の社会的評価は、当該する橋梁が通行不能となった場合に発生するユーザーコストが基本となる。

一方、国内外におけるサービス産業は著しく発達し、欧米諸国ではサービス・サイエンスという新たな学問領域さえ出現してきた^{15),16)}。サービスという言葉に統一された定義はないが、一般に無形性という概念が使われ、いわゆるサービス業もその一つである。本研究で対象とする橋梁を含めた道路ネットワークの貢献度から言えば、物流は大きなウェイトを占めている。物流とは、生産から消費に至るまでの財（商品）の物理的な流れであり、そのための活動、社会資本等の体制を総称したものである¹⁸⁾。したがって、道路ネットワークに属する橋梁群の維持管理も広義の物流に含まれる。

国内貨物輸送量の統計として、一般に輸送活動の実態を知る上でよく使われるトンキロベースで見た場合、前述したように 1994 年時点でトラック輸送の分担率が

50%以上を占めており¹⁷⁾、モダリティシフト政策が推進されながらもトラック輸送は相変わらず伸び続けている¹⁸⁾。また、自然災害により道路交通が途絶して物資輸送が遅れた場合には、決して少なくない損害額が推定されており²⁷⁾、物流におけるサービス効果はユーザーコストと同時に評価すべき項目であると考えられる。ただし、ユーザーコストの算定に用いた交通量の中には物流に関する交通が含まれていると思われるが、本研究では別途、橋梁上を通過する物資およびトラック燃料費等の貨幣価値を物流におけるサービス効果として評価する。

しかし、橋梁の維持管理に関する研究においてこのようなサービス効果が考慮された事例は、非常に少ない。そこで本研究では、北海道における物流データを用いて当該する橋梁群が貢献するサービス効果の評価法について基礎的検討を試み、ユーザーコストとともに後述の補修順位決定に反映させることを目的とする。以降、計算過程を順に説明する。

(1) 物流ネットワークの把握^{17),18)}

一企業から見た物流はその性格によって、調達物流（商品、材料等の仕入れ）、生産物流（生産地から市場までの商品移動）、販売物流（市場において顧客に届ける部分）、回収物流（容器、返品等の受け入れ）に分類される。これらは例え同一の輸送ルート、流通施設を使って行われていたとしても、それぞれ管理・評価の仕方が異なり、一般にミクロの物流と称される。それに対してマクロの物流は、域間物流、域内物流に分類され、本研究では、生産地から市場（消費地）に至るまでの域間物流について検討した。

まず始めに、北海道における物流ネットワークを把握する。本研究では、財団法人運輸政策研究機構の貨物・旅客地域流動調査²⁸⁾における府県相互間輸送トン数（32品目分類）を用い、北海道7地域（地域A～G）相互間の自動車輸送のみ抽出した。しかし、当該地域における橋梁群のサービス効果を定量的に評価するためには、より詳細な物流ネットワークの把握が必要である。そこで今回は、各地域における市町村単位で検討し、当該地域からその他6地域に搬出する場合は当該地域における市町村毎の産業別生産額に応じて輸送量（搬出量）を振り分け、当該地域がその他6地域から搬入する場合は当該地域における市町村毎の商品販売額に応じて輸送量（搬入量）を振り分けた。ここで用いた産業別生産額および商品販売額は、表-3に示す最新の統計データを参考とした。また、当該地域内の物流（域内物流）に関しては、その詳細な物流ネットワークの把握が困難であることから考慮していない。なお、当該地域の発着地は、実際には産業毎に異なると思われるが、今回は便宜的に各市町村の役場と仮定し、その他6地域の発着地は、国勢調査（平成17年度）に基づく最大人口都市の役場と仮定した。そして、各役場間の輸送ルートは電子地図²³⁾のルート探索機能を活用し、一般優先ルートと仮定した。ただし、原単位が不明であった特掲品目については除外した。

表-3 統計調査概要³⁰⁾

産業名	参照項目	統計調査名	調査年度
農業	耕種産出額	生産農業	平成17年度
畜産業	畜産産出額	所得統計	
水産業	漁業生産高	北海道水産現勢	平成17年度
林業	森林蓄積量	北海道林業統計	平成17年度
工業	製造品出荷額	工業統計調査	平成17年度
商業	商品販売額	商業統計調査	平成16年度

表-4 産業・品類・品目の分類および各種原単位²⁹⁾

産業名	品類名	品目名	原単位 (万円/t)	輸送単価 (円/t・km)
農業	農水産品	穀物	50.2	77.2
		野菜・果物		
		その他の農産品		
畜産業	畜産品			
水産業	水産品			
林業	林産品	木材	14.3	43.5
工業	鉱産品	炭	4.1	2.9
		石		
		金属		
		砂利・砂・石材		
	金属機械工業品	鉄鋼	79.0	63.4
		非鉄金属製品		
		機械		
	化学工業品	セメント	19.8	28.0
		その他の窯業品		
		石油製品		
		石炭製品		
		化学肥料		
	軽工業品	紙・パルプ	46.3	107.4
繊維工業品				
食料工業品				
雑工業品	日用品	105.8	147.1	
	その他の製造工業品			
特殊品	金属くず	17.0	48.8	
	動植物性飼肥料			
特掲品	その他	-	-	

(2) 物流におけるサービス価値の定量化

物流におけるサービス価値は、輸送価値（＝品別原単位×各地域間の輸送量）と輸送経費（＝輸送単価×輸送距離×各地域間の輸送量）の合計とした。

輸送価値は、輸送される物の価値であり、品別原単位に各地域間の輸送量を乗じて算定する。ここで品別原単位は、国土交通省が5年毎に実施している貨物純流動調査（物流センサス）²⁹⁾の産業業種別各種出入荷量原単位（出入荷額1万円当りの出入荷量）および産業業種・品別年間出入荷量を用い、表-4に示す数値を設定した。

輸送経費は、輸送に掛かるトラック燃料費、人件費等を含み、輸送単価に各地域間の輸送距離および輸送量を乗じて算定する。輸送単価についても物流センサス²⁹⁾に基づき、表-4に示した北海道内の輸送単価（トラック計）を用いた。輸送距離は、今回仮定した各市町村役場間の一般優先ルートにおける距離を計測した。

(3) 橋梁サービス価値の評価法

ここでは以上で算定された市町村毎のサービス価値を輸送ルートに沿って各橋梁に分配する。今回は便宜的に各市町村内の役場を発着地と仮定したが、実際に何処から国道に流入するかを特定するのは非常に難しい。そこで1橋毎にサービス価値を分配する際には、同じ市町村内に所在する橋梁群には同等の価値を与え、その後は輸送ルートに沿って市町村毎のサービス価値を加算した。

図-1は、3市町村(a~c)に6橋の橋梁群(1~6)が存在した場合の橋梁サービス価値の分配例を示している。まず、1~2橋にa市の500万円、3橋にc村の200万円、4~6橋にb町の300万円をそれぞれ与える。次に着地点(目的地)まで輸送ルートに沿って、4橋にa市からの500万円を加算し、5橋にc村からの200万円を加算し、6橋にa市およびc村からの合計700(500+200)万円を加算する。その結果、1~6橋のサービス価値は、図-1のように確定される。

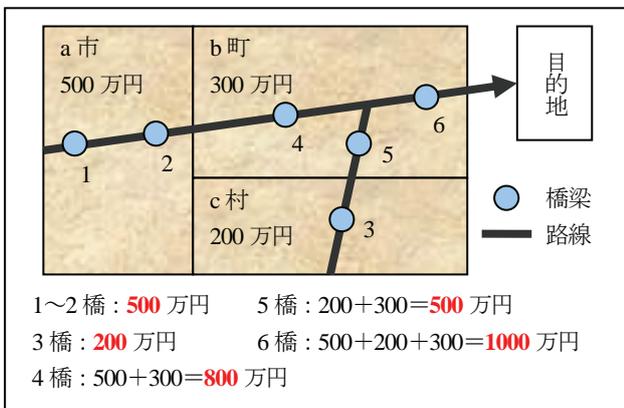


図-1 橋梁サービス価値の分配例

(4) 算定結果

ここで一例として、46市町村で構成される地域A内の国道橋517橋の算定結果を示す。図-2に地域Aから6地域(B~G)への年間輸送量(搬出量)を示し、図-3に6地域(B~G)から地域Aへの年間輸送量(搬入量)を示している。これらの図より、地域Aに関しては主に地域B~Dとの取引が多くなっている様子が分かる。品別原単位および輸送単価の大小によっても異なるが、基本的には輸送量に応じてサービス価値が高まり、これらの輸送量を用いて算定した橋梁サービス価値には各地域間における物流の傾向が反映されることとなる。

以上の算定結果を集計し、表-5に橋梁サービス価値の代表値、図-4に橋梁サービス価値の頻度分布を示した。図-4の左縦軸には頻度、右縦軸には累積相対度数を取っている。地域A内の橋梁サービス価値は、比較的輸送量の少ない地域E~Gとの間に位置する多くの橋梁群において通過頻度が低ければ30,000(千円/年)以下に分布する。また、輸送量の少ない地域間でも通過頻度が高い、もしくは比較的輸送量の多い地域B・Cとの間に位置する橋梁群であれば80,001~300,000(千円/年)に

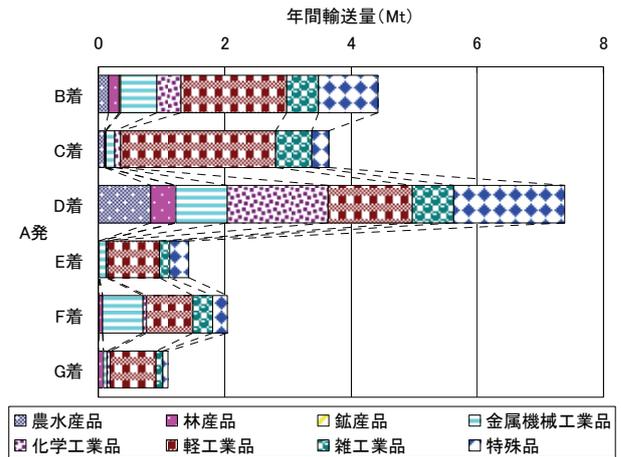


図-2 地域Aから6地域(B~G)への年間輸送量²⁸⁾

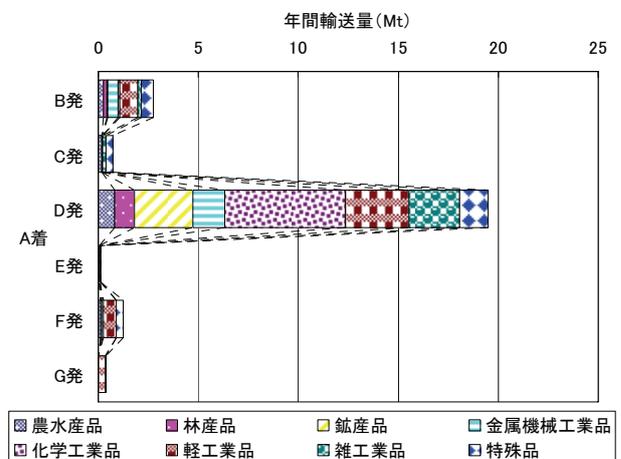


図-3 6地域(B~G)から地域Aへの年間輸送量²⁸⁾

表-5 橋梁サービス価値(517橋)の代表値

最大値	1,418,008 (千円/年)
最小値	982 (千円/年)
平均値	332,866 (千円/年)
最頻値	88,758 (千円/年)

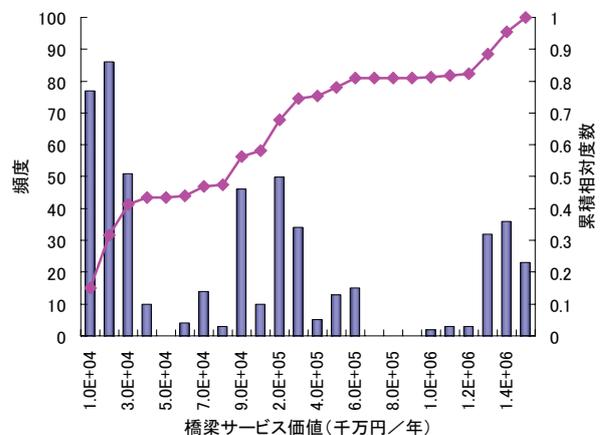


図-4 橋梁サービス価値(517橋)の頻度分布

分布する。さらに、最も輸送量の多い地域Dとの間に位置する橋梁群および輸送量の割合が多い市町村内の橋梁群は1,200,001(千万円/年)以上に分布する。したがって、全体的に各地域間の輸送量が橋梁サービス価値に大きく影響することを確認できた。

4. 複数のパラメータを考慮した補修順位決定法

これまでに橋梁の補修順位決定に関する研究が数多く報告されてきた。古田らは、RC床版に着目し、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて損傷状態、予算、迂回路線における交通規制等の制約条件を考慮した道路ネットワークに点在する橋梁群の補修順位決定支援システムを構築している^{10),11)}。小幡らは、階層分析法(AHP)を用いて橋梁各部材の点検項目に重み付けし、橋梁点検データに基づく劣化順位判定プロセスを構築している³⁾。杉本らは、ユーザーコストを橋梁の価値と位置付けて橋梁各部材に分配し、部材の劣化により低下した価値が補修により元に戻される便益と補修費の比(費用便益比)に基づく補修順位決定法を提案している⁴⁾。

本研究では、前章までに述べた橋梁の資産的評価および社会的評価における各パラメータを考慮した補修優先度指数を評価するが、各評価値の重み付けには管理者の主観的な判断が伴う。そこで、包絡分析法(DEA)による客観的な評価結果と比較することで補修優先度指数における各評価値の合理的な重みを提示し、管理者の政策決定を支援する。

4.1 補修優先度指数

ここでは物理的劣化度が大きく、ユーザーコストとともに地域経済におけるサービス効果の大きい橋梁が優先的に補修されるべきであると考え、前章までに述べた資産的評価および社会的評価における各パラメータをそれぞれ以下のように基準化し、さらに各評価値に任意の重みを付けて補修優先度指数を評価する。ただし、資産的評価では橋梁の規模が大きいほど多額の補修費が必要となることを考慮し、LCC低減の観点から物理的劣化度を初期資産(建設費)の規模で割増した。また、社会的評価では物流におけるサービス効果が大きいほど迂回による社会的損失が増大するものと考え、ユーザーコストをサービス価値の規模で割増した。

なお、各評価値の重みは管理者の政策判断に基づき任意に設定できるが、今回は表-6に示す数値を用いて感度分析を行った。

$$P = w_A P_A + w_U P_U \quad (6)$$

$$P_A = \left(1 + \frac{A_i}{A_a}\right) \frac{\Delta A_i}{A_i} \quad (7)$$

$$P_U = \left(1 + \frac{S_i}{S_a}\right) \frac{\Delta C}{C_u} \quad (8)$$

表-6 重み(固定ウェイト)の設定

	w_A	w_U	重みの偏り
Case1	0.9	0.1	資産的評価値の重視
Case2	0.8	0.2	
Case3	0.7	0.3	
Case4	0.6	0.4	
Case5	0.5	0.5	同等
Case6	0.4	0.6	社会的評価値の重視
Case7	0.3	0.7	
Case8	0.2	0.8	
Case9	0.1	0.9	

ただし、

P : 補修優先度指数

P_A : 資産的評価値, w_A : 資産的評価値の重み

P_U : 社会的評価値, w_U : 社会的評価値の重み

A_i : i 橋の初期資産

A_a : 開発建設部毎の平均初期資産

ΔA_i : i 橋の損傷による減少資産(初期資産-現在資産)

S_i : i 橋のサービス価値

S_a : 開発建設部毎の平均サービス価値

ΔC : 迂回による損失走行経費

C_u : 通常路走行経費

4.2 重み付けの問題点

前述した補修優先度指数では、資産的評価値および社会的評価値の重み付けにおいて管理者の政策判断が明確に反映されるが、一般に恣意性が生じる。また、その重み自体は客観性・必然性に欠けるとともに、固定された重みによって個々の得意分野(強み)が打ち消される可能性がある。例えば、資産的評価値が高く社会的評価値が低い橋梁に対して、社会的評価値が重視された場合、資産的評価値の重要性が打ち消されてしまう。

そこで、このような重み付けの問題に対して誰が評価しても同じ結果となり、個々の得意分野(強み)を活かした可変ウェイトにより評価できる包絡分析法(DEA)の適用を試みた。DEAは、各事業体(Decision Making Unit, DMU)の効率性を分析する手法であり、経営工学等の分野において応用されている。小幡らは、補修橋梁選定におけるDEAの適用性について基礎的検討を試みているが^{12),13)}、本研究では、補修優先度指数における各評価値の主観的な重み付けに対してDEAによる客観的な評価結果と比較し、各評価値の合理的な重みを把握することに主眼を置く。なお、DEAの理論および橋梁の補修順位決定に応用する考え方については、次節で説明する。また本解析に当たり、表-7に各評価法の特徴を整理する。

4.3 DEA解析^{12),13),32)-36)}

DEAでは、投入(入力)に対する産出(出力)の比から各事業体(DMU)の効率性を求める。これは一般にD効率値と称され、入出力データに未知の可変ウェイトを

乗じて加えた仮想的入出力の比で評価される。この可変ウェイトは、各事業体 (DMU) が最も有利となるように決定され、数学的には線形計画問題の解から得られる最適基底に置き換えられる。そして、D 効率値が 1 となる DMU は効率的であり、一般に効率的 DMU と称される。それ以外の非効率的と判断された DMU は効率的 DMU を基準とした相対尺度で評価される。

ここで分数計画問題に基づけば以下のように定式化され、これは目的関数の分母が一定値である場合に線形計画問題と同値になる。

$$\text{目的関数: } \max \theta_i = \frac{\sum_{s=1}^n u_s y_{si}}{\sum_{r=1}^m v_r x_{ri}} \quad (9)$$

$$\text{制約条件: } \theta_i \leq 1, v_r \geq 0, u_s \geq 0 \quad (10)$$

ただし、

θ_i : D 効率値, $m=1, n=3$

x_{ri} : 入力パラメータ, v_r : 入力の重み

y_{si} : 出力パラメータ, u_s : 出力の重み

以上の理論に基づき本研究では、小幡らの研究^{12),13)}と同様に D 効率値の高い橋梁ほど優先的に補修すべきものと考え、DEA の基本的モデルである CCR モデルで解析した。DEA 解析では、基本的に入力が小さく、出力が大きいものが効率的と判断されるため、本研究では、橋梁健全度指数 (BHI) が低く、資産規模による経済的損失リスク、迂回による社会的損失リスクおよび地域経済におけるサービス効果が大きい橋梁が優先的に補修されるべきであるという考え方に基づき、表-8 のように入出力パラメータ (1 入力 3 出力) を設定した。ただし、表-8 中の迂回係数が 0 (損失走行経費がマイナス) の場合、解析上不都合が生じるため、極微小な値 0.001 を代入した。なお、小幡らは、1 入力 2 出力 (入力: 信頼性理論に基づく余寿命, 出力 1: ユーザーコスト, 出力 2: 再建設費用) により評価している^{12),13)}。

4.4 実橋データに基づく各評価法の比較・検証

ここでは前述した補修優先度指数および DEA 解析の各評価法を用いて、3.2 節で示した地域 A における国道橋について補修順位付けを試みる。ただし、この地域 A は非常に広範囲に渡っており、北海道開発局の 3 開発建設部が混合しているが、実際には開発建設部毎に維持管理することから、今回は 1 開発建設部 (3.1 節で示した建設部 A) において各評価値のデータが揃っている橋長 15m 以上の国道橋 235 橋を対象とした。なお、前述したようにサービス係数は、開発建設部毎の平均サービス価値に対する各橋梁のサービス価値で評価し、地域 A における国道橋 517 橋の平均値とは異なっている。また、資産的評価値に関して複数年度の点検結果がある場合は、最近の点検結果により評価している。

表-7 各評価法の特徴

	補修優先度指数 (固定ウェイト)	DEA (可変ウェイト)
評価方法	各パラメータの加重合成による「絶対評価」	効率的 DMU に対する「相対評価」
長所	任意の重み付けが可能であり、実務的に自由度が高い。また、その重み付けには管理者の政策判断が明確に反映される。	誰が評価しても同じ結果となるため、客観的に評価できる。また、個々の得意分野 (強み) が活かされ、平均的に優れていなくても部分的に特化していれば高く評価される。
短所	管理者の主観的な判断により、重み付けの客観性・必然性に欠ける。また、一定の重みによって個々の得意分野 (強み) が打ち消される可能性がある。	管理者の政策判断に基づく明確な評価ができない。また、効率的 DMU が多数抽出された場合、T 効率値, Super 効率値等により再度評価しなければならない ^{13),32),36)} 。

表-8 入出力パラメータ

入力	橋梁健全度指数 (BHI)	資産的評価 グループ
出力	資産規模 : A_i/A_a	
	迂回係数 : $\Delta C/C_u$	社会的評価 グループ
	サービス係数 : S_i/S_a	

ここで解析結果として、各評価法に基づく上位ランキングの傾向および全体的なランキングの相関性について分析し、これまでに蓄積されてきた補修実績データを用いて各評価法の妥当性を検証した。また、今回新たに考慮したサービス効果の補修順位に与える影響について、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) を用いて検証した。そして最後に、今回検討した評価法の実務段階における留意点を付記した。なお、これ以降、補修優先度指数に基づく補修順位を優先度順位、DEA 解析の D 効率値に基づく補修順位を効率性順位と称する。

(1) 上位ランキングの傾向

以上の各評価法に基づき、上位にランキングされた橋梁群における各評価値の傾向について検証する。図-5 は資産的評価値を重視した場合 (Case3)、図-6 は両評価値を同等に評価した場合 (Case5)、図-7 は社会的評価値を重視した場合 (Case7)、図-8 は DEA 解析における上位 30 橋の諸数値を示している。ただし、効率性順位 1~4 位は同着 1 位 (効率的 DMU) である。ここでは DEA 解析に用いた入出力パラメータを左右の縦軸に分けて表示している。また、表-9 には各パラメータの代表値を示し、

上位 30 橋の諸数値の参考値としている。これらの諸数値によれば、優先度順位において管理者が重視した評価グループのパラメータが高く評価されているが、基本的には平均的に評価値が高い橋梁群である。それに対して効率性順位では、1 個でも高い評価値があれば総合的にも高く評価される傾向にあるため、順位毎に諸数値の大小が交互に表れている。また、社会的評価グループより資産的評価グループのパラメータが重視される傾向にあるが、DEA では他と異なる特徴を持つ場合に高く評価されることがあり、比較的分散の大きい資産規模が全体的に高く評価されていることが推察される。一方、BHI が高い場合でも特に社会的評価グループのパラメータが著しく大きければ上位にランキングされており、これらは予防保全的対策が必要であることを数値として裏付けているため、今後増えていくと思われる予防保全型の維持管理において有効的に活用されることが期待できる。

表-10には効率性上位 30 橋の優先度順位を示しているが、色付き (水色) 部分は各ケースで上位 30 位にランクインした橋梁群であり、その内 11 橋が全ケースで上位 30 位にランクインしている。これらは特徴の異なる評価法において絶対的に高い評価を得ていることから、特に重点的に補修すべき橋梁群であることが言える。また、資産的評価値の重みが大きくなるにつれてランクアップしている橋梁群は、資産的評価値に強みを持っていることが推察されるが、社会的評価値が重視されるゾーンにおいては全体的にランク変動が小さく、Case5 でも十分に社会的評価値が反映されていることが分かる。

表-9 各パラメータの代表値

	最大値	最小値	平均値	分散
BHI	100.0	29.9	83.7	183.4
資産規模	11.516	0.052	1.000	2.581
迂回係数	8.720	0.000	0.902	1.015
サービス係数	3.214	0.010	1.000	1.494

表-10 効率性上位 30 橋の優先度順位

DMU	DEA	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
#01	1	3	4	11	19	34	49	74	110	157
#02	1	10	9	7	6	6	6	5	5	5
#03	1	8	23	33	39	49	51	57	61	67
#04	1	27	42	49	55	61	67	67	75	78
#05	5	4	1	1	1	1	1	1	1	1
#06	6	11	8	5	5	4	4	4	4	4
#07	7	5	7	4	4	5	5	6	6	7
#08	8	17	11	10	8	8	8	9	9	9
#09	9	2	3	9	20	35	58	97	152	210
#10	10	13	5	2	2	2	2	2	2	2
#11	11	19	41	53	72	88	105	117	126	145
#12	12	1	2	6	18	29	46	72	114	164
#13	13	9	6	3	3	3	3	3	3	3
#14	14	20	16	19	16	16	16	16	16	16
#15	15	16	24	22	27	25	26	27	27	31
#16	16	7	22	31	37	44	47	52	60	64
#17	17	18	26	24	29	27	27	28	30	32
#18	18	24	21	20	17	17	17	17	17	17
#19	19	38	43	43	46	45	42	43	43	41
#20	20	15	31	44	52	67	76	88	97	108
#21	21	44	61	81	97	110	121	132	146	150
#22	22	14	10	8	7	7	7	8	8	8
#23	23	30	29	32	30	28	28	29	28	28
#24	24	49	46	48	48	48	43	42	40	39
#25	25	23	25	21	22	20	21	21	21	21
#26	26	113	128	136	141	143	153	155	158	155
#27	27	125	137	143	145	150	156	157	159	156
#28	28	36	36	34	32	30	30	30	31	29
#29	29	53	70	86	99	107	117	120	125	127
#30	30	62	57	57	57	56	59	56	58	58

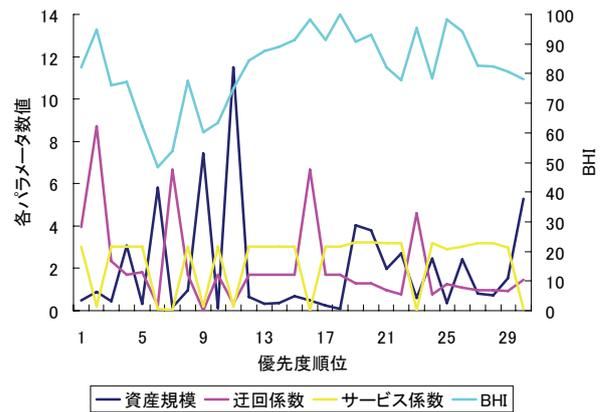


図-5 優先度上位 30 橋の諸数値 (Case3)

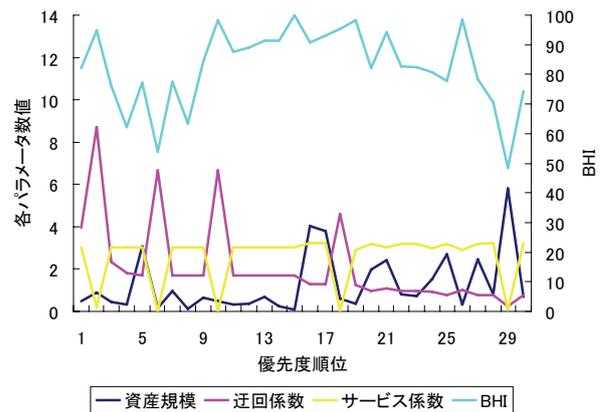


図-6 優先度上位 30 橋の諸数値 (Case5)

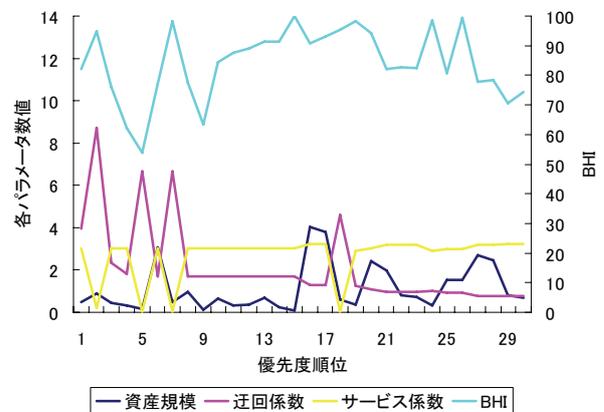


図-7 優先度上位 30 橋の諸数値 (Case7)

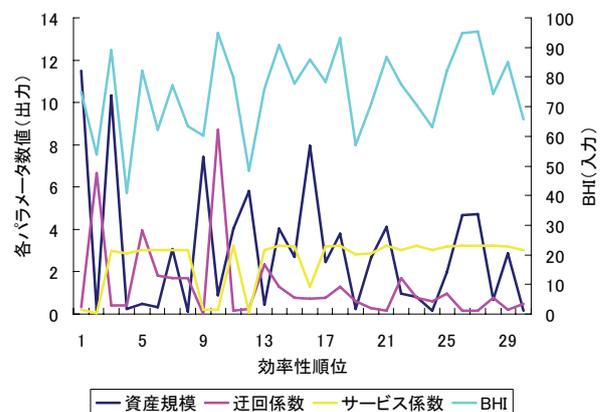


図-8 効率性上位 30 橋の諸数値

(2) ランキングの相関性

上位の傾向については前述したが、ここでは全体的なランキングの相関性について検証する。図-9に優先度順位と効率性順位の関係を示し、図-10にそれらの相関係数を固定ウェイトのケース毎に示している。全体的に優先度順位より効率性順位の高い橋梁群が目立っているが、これはDEAが部分的に特化したパラメータを高く評価する傾向を示している。すなわち、補修優先度指数では一部のパラメータが低い値であるために総合的にも低く評価されていた橋梁群が、DEAでは高く評価された結果である。一方、Case3およびCase4において客観的に評価された効率性順位と比較的高い相関性が見られることから、これらの重み付けが合理的であると判断できるとともに、DEA解析では資産的評価グループのパラメータが多少重視される傾向にあることが推察される。

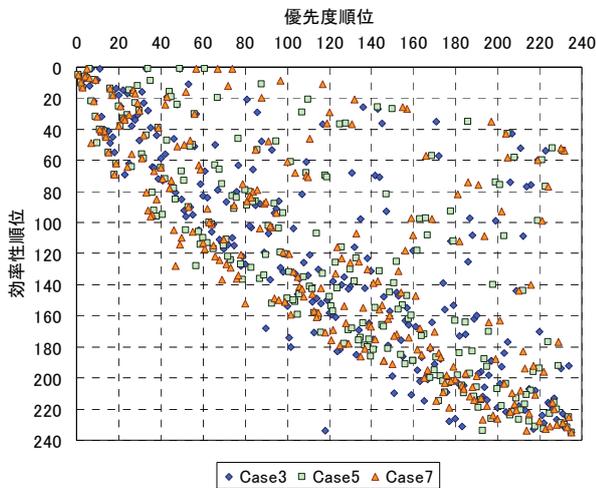


図-9 優先度順位と効率性順位の関係

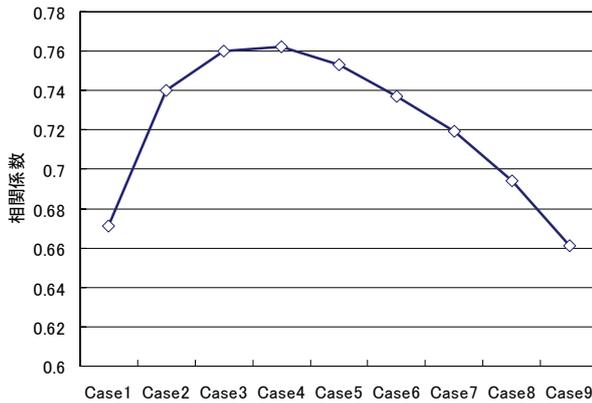


図-10 固定ウェイトの変動による相関係数の推移

(3) 補修実績データに基づく評価項目の妥当性

北海道内国道橋の補修実績は、MICH I 等に 2005 年までの実績データが蓄積されてきた。そこで今回は、これらの補修実績データを用いて本研究で検討した補修順位決定における評価項目の妥当性を検証する。ただし、ここでは物理的劣化度を評価した最近の点検以後に行われた補修実績のみ抽出した。すなわち、点検以前に行われた補修に関しては、その補修による健全度の回復が評価

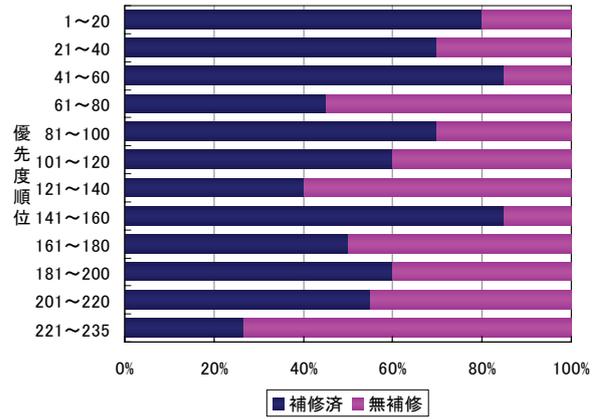


図-11 優先度順位グループ毎の補修割合 (Case3)

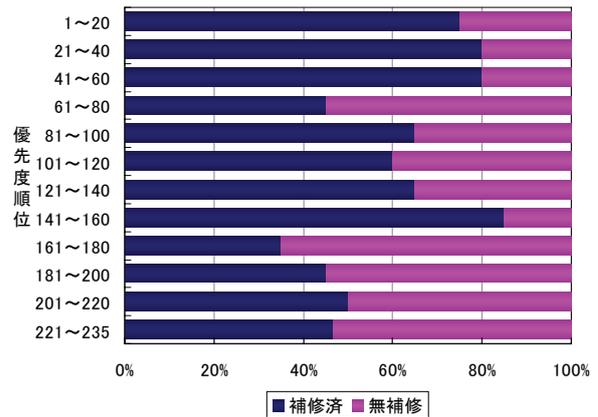


図-12 優先度順位グループ毎の補修割合 (Case5)

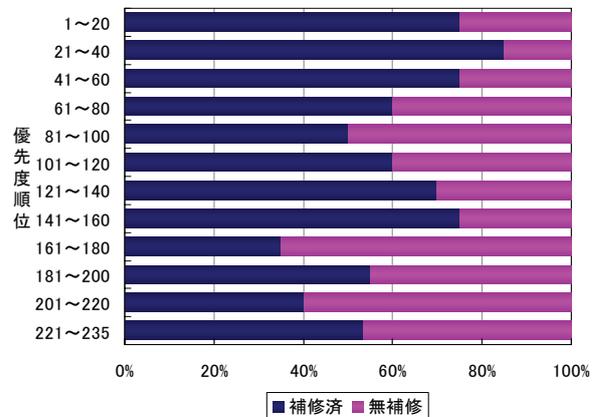


図-13 優先度順位グループ毎の補修割合 (Case7)

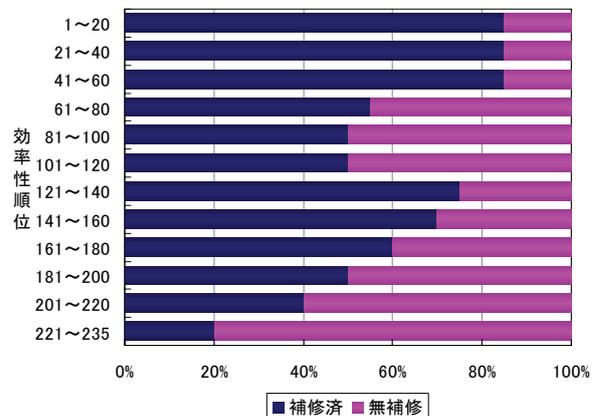


図-14 効率性順位グループ毎の補修割合

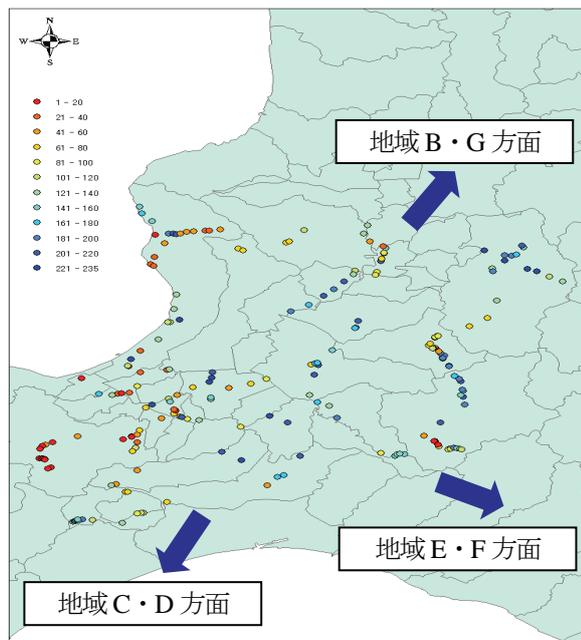


図-15 優先度順位グループ毎の橋梁分布 (Case5)

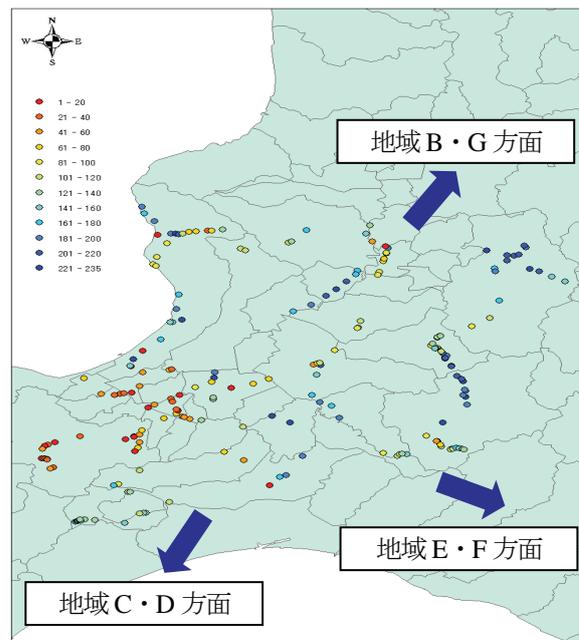


図-16 効率性順位グループ毎の橋梁分布

値に反映されているものと考え、対象外とした。また、今回の評価値が物理的劣化度に加えてユーザーコストおよびサービス効果を考慮していることから、部材の損傷に対する補修・補強以外に拡幅等も含めた補修全般を対象としている。

図-11～図-14に20位刻みでグルーピングした優先度順位 (Case3, Case5, Case7) および効率性順位グループ毎の補修割合を示す。ここで例えば、1～20位グループの橋梁群において15橋の補修実績が確認された場合、そのグループにおける補修割合は75% (=15/20) となり、最下位グループは15橋中の補修橋数で計算している。その結果、上位60橋の補修割合が約80%程度あり、評価値 (補修順位) の高い橋梁群が優先的に補修されている傾向が見られた。したがって、実際の維持管理では概ね今回の評価項目を考慮して補修順位が決定されていることが推察される。しかし、61位以降では一概に評価値 (補修順位) が高いほど補修割合が多くなるとは言えず、実際の維持管理において今回の評価項目以外に何らかの要素が考慮されていることを示唆している。現に、資産的評価では点検データ²⁰⁾に基づく部材の損傷度を考慮しているが、示方書の改訂に伴う耐震性の不足等は考慮されていない。また、社会的評価において路線の重要度に関する様々な評価項目は考慮されていない。今後、このような不足している要素を考慮する必要があるが、全体的には本研究で検討した補修順位決定における評価項目が概ね妥当であることを示すことができた。

(4) GISによるサービス効果の検証

土木の分野では、地震等に対する防災システムとして地理情報システム (GIS) が活用されており、ハザードマップ、避難場所および避難経路図等の作成に有効的で

ある^{38),39)}。前述したように橋梁サービス価値は輸送量に応じて高まる傾向にあり、サービス係数の大きい橋梁群が上位にランキングされることを確認したが、ここでは補修順位をGIS上に表示させ、輸送量の多い地域間に位置する橋梁群のサービス効果を地図上で検証する。そこで今回は、ArcGISを用いて20位刻みでグルーピングした優先度順位 (Case5) および効率性順位グループ毎の橋梁分布を図-15、図-16のように色分けして表示した。ただし、赤色が強いほど補修順位が高く、青色が強いほど補修順位が低いことを示している。

ここで、3.2節で示した地域Aからその他6地域 (地域B～G) 相互間の輸送量 (図-2、図-3) と照らし合わせれば、特に輸送量の多い地域C・D方面に上位 (赤色) の橋梁群が集中している様子が確認できる。すなわち、今回新たに考慮したサービス効果が補修順位に大きく反映されていることが分かる。このようなサービス効果の大きい橋梁群を優先的に補修することで橋梁被害による社会的損失を抑制することが期待できるとともに、上図のように重要橋梁群が視覚的に判断できれば、維持管理の現場においてもGISが有効的に活用できるものと考えられる。

(5) 実務段階における留意点

本研究で検討した評価法の利点は、物理的劣化度とともに種々の社会的評価を考慮して補修順位が決定できることであり、前述したようにBHIが高いレベルを保持している場合でも社会的評価値が高ければ上位にランキングされる結果が得られた。すなわち、これらの橋梁群には予防保全的対策が必要であることを数値的に示すことが可能となる。しかし、社会的評価値が低いために物理的劣化が進行していても下位にランキングされる場合が

あり、Case3～Case9 および DEA 解析において補修順位が 100 位以降で BHI が 50 以下の橋梁群が約 1～2% 存在した。このまま劣化した橋梁が放置されれば非常に危険であるが、これらは社会的評価値が低いことから、安全性を確保する上で仮に使用規制を設けたとしても迂回による社会的損失が小さい橋梁群であると判断できる。

ただし、ここでは物流サービスに着目した社会的評価値を検討しているが、当該する橋梁周辺の地域性を十分に考慮し、医療等の様々な分野におけるサービス効果を検討していく必要がある。また、各橋梁の補修優先度を適確に判断するためには、橋梁が位置する地域性や個別の自然環境および社会環境を適切に反映できるシステムに近づけていくことが必要である。

5. 結論

本研究では、これまでに評価した橋梁の資産価値およびユーザーコストに加えて、物流における橋梁サービス価値を考慮した補修優先度指数について検討し、各パラメータ間の重み付けに対して包絡分析法 (DEA) を適用した。今回得られた結論を以下に要約する。

- (1) 地域経済における物流サービスに着目し、橋梁群が貢献しているサービス効果を定量的に評価する手法を検討し、総合的な補修順位に反映させることができた。
- (2) 複数の異なるパラメータ間の重み付けに対して DEA 解析を行うことにより、補修優先度指数における資産的評価値および社会的評価値の重みが 7 対 3、もしくは 6 対 4 の比率で維持管理することが合理的であることが分かった。
- (3) DEA 解析では、効率的 DMU (補修順位 1 位) が多数抽出される可能性があったが、同着 1 位は全体の約 1.7% (4/235 橋) に過ぎず、再度評価することなく補修橋梁が選定できたと考えられる。
- (4) 上位ランキングの傾向から、橋梁健全度指数 (BHI) が高いレベルを保持している場合でも社会的評価値が著しく大きければ、予防保全的対策が必要であることを数値として示すことができた。
- (5) これまで蓄積されてきた補修実績に基づけば、上位の橋梁群が優先的に補修されており、今回検討した補修順位決定における評価項目が概ね妥当であることを示すことができた。
- (6) GIS を用いることで輸送量の多い地域間におけるサービス効果の高い橋梁群が上位にランキングされている様子が確認でき、このような重要橋梁群が視覚的に判断できれば維持管理の現場においても GIS が有効的に活用できるものと考えられる。

今回は、補修優先度指数における各評価値の合理的な重みを把握するために DEA との比較を試みた。両手法の扱い方には検討の余地があるが、補修優先度指数では各評価値の重み付けにおいて管理者が行うべき政策判断を明確に反映できるという点で有効な場合もある。

また、新たにサービス効果を考慮した補修順位決定法に関する基礎的検討を試みたが、今後は各評価値の精度向上が課題である。特に社会的評価値では道路ネットワーク内の交通量配分等を考慮した詳細な評価が必要であるとともに、橋梁被害の具体的なシナリオを想定した検討も必要である。さらに、前述したように当該する橋梁周辺の地域性を十分に考慮した上で物流以外のサービス効果を検討していく必要がある。そして、物理的劣化度以外に適切な社会的評価値が考慮されることで、BHI が高い橋梁に対する予防保全の必要性が高まるとともに、社会的損失が小さいことを把握した上で著しく劣化した橋梁に対しては使用規制等を含めた検討ができる。

なお、各橋梁の評価する時点 (点検年度) にばらつきがあるが、著者らが提案してきた劣化予測⁴⁰⁾と併用することで評価の時系列が揃えられ⁴¹⁾、長期的な LCC 評価も導入した補修計画のシミュレーションが可能になるものと考えられる。

謝辞: 本研究を行うに当たり、竹田俊明氏 (財団法人北海道道路管理技術センター)、舛川誠氏 (北見通運株式会社) には大変有益なアドバイスを頂きました。また、高柳達徳氏 (鹿島建設株式会社)、山崎智之助教 (北見工業大学) には多大なご助力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

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.
- 2) 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.
- 3) 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評価の試み, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.983-989, 2001.
- 4) 杉本博之, 阿部淳一, 赤泊和幸, 渡邊忠朋: 公共投資の経年的シナリオに対する橋梁の健全度推移に関する研究, 土木学会論文集, No.780/ I -70, pp.199-209, 2005.
- 5) 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, 土木学会論文集, No.745/ I -65, pp.131-142, 2003.
- 6) 古田均, 小山和裕, 大井美樹, 杉本博之: 地震リスクを考慮した大阪府道路ネットワークにおける RC 橋脚のライフサイクルコスト評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.269-276, 2004.
- 7) 近田康夫, 橋謙二, 城戸隆良, 小堀為雄: GA による既存橋梁の補修計画支援の試み, 土木学会論文集, No.513/ I -31, pp.151-159, 1995.
- 8) 近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則: ウィルス進化型 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.

- 9) 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.
- 10) 古田均, 市田孝治, 堂垣正博: 道路橋 RC 床版の補修順位決定支援システムに関する研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.511-520, 1998.
- 11) 古田均, 能勢善夫, 大村和久, 堂垣正博: 鋼橋 RC 床版の道路ネットワークを考慮した補修順位決定支援システムの構築, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.309-319, 2000.
- 12) 小幡卓司, 井田俊輔, 倉戸亮, 林川俊郎, 佐藤浩一: 橋梁の健全度・余命とユーザーコストを考慮したマネジメントシステムに関する基礎的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, I-105, pp.209-210, 2004.
- 13) 小幡卓司, 佐藤圭太: 各種パラメータを考慮した BMS における超包絡分析法の適用性, 土木学会北海道支部, 論文報告集, 第 63 号, A-2, 2006.
- 14) 大島俊之, 三上修一, 丹波郁恵, 佐々木聡, 池田憲二: 橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析, 土木学会論文集, No.703/ I-59, pp.53-65, 2002.
- 15) 日高一義: サービス・サイエンスにまつわる国内外の動向, 文部科学省科学技術政策研究所, 報告, 2005.
- 16) 安部忠彦: 「サービスサイエンス」とは何か, 富士通総研 (FRI) 経済研究所, 研究レポート, 2005.
- 17) 鈴木安昭, 関根孝, 矢作敏行共著: マテリアル流通と商業 (第 2 版), 有斐閣, 2000.
- 18) 中田信哉編著: 入門の入門 物流のしくみ, 日本実業出版社, 1997.
- 19) 堀倫裕: アセットマネジメントとリスク評価ーリスクを考慮した LCC 評価に基づく維持管理計画手法一, 橋梁と基礎, Vol.40, No.8, 2006.
- 20) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領 (案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988.
- 21) Thompson, P. D., Small, E. P., Johnson, M. and Marshall, A. R.: The AASHTO Ware Pontis Bridge Management System, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 22) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No.675/ I-55, pp.201-217, 2001.
- 23) ZENRIN: ゼンリン電子地図帳 Z8, 2005.
- 24) 道路投資の評価に関する指針検討委員会: 道路投資の評価に関する指針 (案), 財団法人日本総合研究所, 1998.
- 25) 国土交通省道路局: 費用便益分析マニュアル, 2003.
- 26) 国土交通省道路局: 平成 11 年度道路交通センサス, 社団法人交通工学研究会, 2001.
- 27) 三村泰広, 寺内義典, 川本義海, 本多義明: 道路交通途絶が物流に及ぼす影響に関する一考察ーH13 大雪を対象としてー, 土木学会第 57 回年次学術講演会, IV-307, pp.613-614, 2002.
- 28) 財団法人運輸政策研究機構: 貨物・旅客地域流動調査, 2004.
- 29) 国土交通省: 第 7 回貨物純流動調査 (物流センサス), 2000.
- 30) 北海道庁地域復興・計画局統計課: 北海道の統計情報, <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sk/tuk/index.htm>
- 31) 小幡卓司, 井田俊輔, 宮森保紀, 林川俊郎, 佐藤浩一: 橋梁点検データと意識調査に基づいた劣化順位決定手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.675-684, 2004.
- 32) 佐藤丈晴, 海野達夫, 三角衡一郎, 永井泉治: 道路橋の長寿命化修繕計画における事業優先順位設定手法の適用事例, 土木学会第 62 回年次学術講演会, VI-278, pp.555-556, 2007.
- 33) 加藤豊, 小沢正典共著: OR の基礎 AHP から最適化まで, 実教出版, 1998.
- 34) 五十嵐日出夫編著: 土木計画数理, 朝倉書店, 2002.
- 35) 福井正康, 細川光浩: 社会システム分析のための統合化プログラム 6-DEA・実験計画法・クラスター分析一, 福山平成大学経営情報研究, 7 号, 85-106, 2002.
- 36) 株式会社三菱総合研究所: DEA (包絡分析法) 等定量化手法を用いた技術評価に関する調査報告書, 2002.
- 37) 向井隆行, 大島俊之, 三上修一, 竹田俊明, 丹波郁恵: 橋梁の補修補強実績データの現状分析と補修補強効果の検討, 土木学会北海道支部, 論文報告集, 第 63 号, A-5, 2006.
- 38) 高橋重雄, 井上孝, 三條和博, 高橋朋一: 事例で学ぶ GIS と地域分析, 古今書院, 2005.
- 39) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577/ I-41, pp.1-16, 1997.
- 40) 竹田俊明, 大島俊之, 佐藤誠, 三上修一: 橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1157-1167, 2005.
- 41) 足立幸郎, 小塚幹夫, 大矢敏雄, 関惟忠, 藤井学: 点検時期の異なる構造物における補修優先順位の決定手法, 土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A403, pp.806-807, 1996.

(2007 年 9 月 18 日受付)