

橋梁の損傷度・余寿命と UC を考慮した BMS 構築のための基礎的検討

Fundamental Study on Establishment of BMS in Consideration of Damage Level, Life Span and UC of a Bridge Structure

北海道大学工学部工学研究科○学生員 井田俊輔 (Shunnsuke Ida)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学工学部工学研究科 学生員 倉戸 亮 (Ryo Kurato)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. まえがき

わが国における交通社会資本の整備は、昭和 40 年～50 年代のいわゆる高度経済成長期に数多く行われ、その充実も図られてきた。それから約 30 年経った今日では、基盤施設の年齢は壮年期を迎えつつあると言われており、これらの構造物の老朽化は、このまま無対策で経緯すれば急速に進むことが予測されている。しかしながら、近年における市民意識の向上により、資本投資に対する効率性や環境への影響等に関する関心の高まりや、投資余力そのものの減少から、新たな道路ネットワークの形成を目指すような開発的資本投資は極めて困難であることから、既設の交通社会資本の有効利用・維持管理が今後ますます重要視されることは明らかである。このような社会情勢の中で、橋梁構造物における現況に着目すると、車両の大型化、予想外の交通量増大等の影響を強く受け、種々の損傷が数多く発生している可能性が極めて高いと考えられる¹⁾。よって、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修を行うことにより橋梁の長寿命化を目指すことが重要であるが、効率的・効果的な橋梁構造物のマネジメントを行っていくためには、その構造物の損傷状態や様々な要因によって予測される今後の劣化状況の把握などの技術的な面の他、ライフサイクルコストなどの経済的な面も含めて、それぞれ異なる物理量で表現される判断要因となるものを考慮する必要であると考えられる。また、情報公開等の観点から、対象となる橋梁構造物の補修に至る意思決定のプロセスを、明確に示す必要があるものと思われる。すなわち、上述のように市民の意識向上に伴い、説明責任を果たすことに十分対応可能であり、かつ工学的あるいは数学的な特別な知識等を必要とせずとも簡便に判定が可能となるようなマネジメント手法を早期に確立することが新たな課題である。

以上より、本研究では損傷度評価による橋梁構造物の現状把握、信頼性理論に基づいた劣化予測、ならびに対象橋梁のユーザーコストを算出し、これらの異なるパラメータを包絡分析法 (Data Envelopment Analysis=DEA) を適用して解析することにより、補修優先橋梁の選定が行えるような手法に関して基礎的な検討を行うことを目的とする。

具体的には、ある管理管内におけるいくつかの橋梁群を仮定し、各橋梁に対する AHP を用いた現在の損傷度評価²⁾、信頼性理論に基づいた劣化予測による補修を考慮しない場合の各橋梁の余寿命³⁾、また、周辺の交通状況等

からユーザーコストを算出し⁴⁾、これらのパラメータに対し DEA 解析を実施することで橋梁維持管理計画におけるその適用性および有効性等に関して検討を試みるものである。なお、DEA とは同種の投入 (入力) と算出 (出力) を持つ複数個の事業・活動等の効率性を、最も良いものを基準とした何らかの比率尺度を用いて定量的な相対比較を行うものであり、工学のみならず経営分析等の各種分野においても極めて有効な手段として用いられている。

したがって、本研究では以上のような手法を用いて橋梁維持管理計画におけるその適用性および有効性等に関して検討を加えたのでここに報告するものである。

2. DEA を用いた橋梁維持管理システム (BMS)

前述のとおり、効率的な橋梁維持管理を行うためには、対象となる橋梁群を評価するためのパラメータの選定が非常に重要である。通常では、現状の損傷状態の他にも、今後の予測される劣化状況やライフサイクルコストなどの経済的な面など、その判断材料となるものは様々存在すると考えられている。これらは一般に異なる単位系を有しているため、意思決定支援において同列に取り扱う場合には注意を要する。そこで本研究では、橋梁維持管理の判断材料と思われるものをパラメータに設定し、包絡分析法 (以下、DEA と称す) を用いて本研究において仮定した橋梁群における補修橋梁優先順位を算定した。

本来、DEA とは同種の入出力関係を有する複数の事業体、活動、製品等に対して、比率尺度を用いて効率性を比較する方法であり、最も高い効率性を有する活動を基

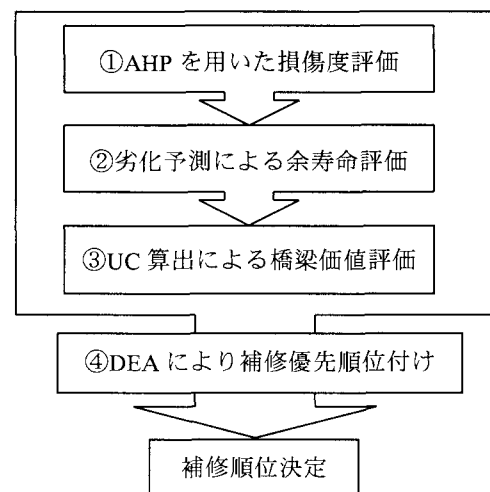


図-1 BMS 全体像

準とした効率値と、効率性が劣った活動に関する入出力の改善案が結果として得られる手法である^{5),6)}。DEAは、従来の回帰分析等のような平均像に基づく大勢順応型の評価とは異なり、最も優れた者をベースとした多基準型の効率性評価手法であると考えられ、複数の入出力の関係からそれぞれの活動の個性と多様性を活かした形の改善案を検討可能であることが知られている。

本研究で考える橋梁維持管理システムにおいては、図-1に示すとおり、維持補修の判断材料となるものとして橋梁の構造形式、損傷状況、その他橋梁周辺の交通データを仮定することで橋梁の損傷度、余寿命、ユーザーコストをそれぞれ算出し、それらを各種パラメータとすることでDEAを用いた解析を実施し、各橋梁のD効率値を算出した。本研究における橋梁維持管理計画においてはDEAによって算出したD効率値の低い橋梁を最も改善の必要な橋梁と考え、その順位付けを行うことで補修計画支援を試みる。また、今回の維持管理シミュレーションでは、DEAにおいて最も一般的なCCRモデルにより解析を行うこととした。

3. 要素解析技術

本研究では上述のように補修橋梁選定にDEAを適用するにあたり、パラメータとなる損傷度、余寿命、ユーザーコストの各要素をそれぞれ以下のように算出した。

3.1 階層分析法(AHP)を用いた損傷度評価

AHPは様々な問題の意志決定を行う手法のひとつである。通常、意志決定においては対象となる問題が存在し、最終的な選択となるいくつかの代替案、それを1つに絞り込むための評価基準を用いて比較を行うことにより、何らかの判断を行うものである。AHPにおいては、これらの「問題」・「評価基準」・「代替案」の関係を階層構造化して取り扱う。この階層構造の各項目に対し一対比較を実施して、各々の重要度を算出し、個々の代替案における各ウエイトの積を求めることにより、比率尺度による評価を行うものである。また、この種の意思決定手法で問題になる全体を通しての判断の整合性についても検討可能である。本研究では、旧国土交通省土木研究所による「橋梁点検要領(案)」および北海道開発局道路維持管理課による「道路橋の点検および補修・補強設計施工要領(案)」等^{7),8)}に基づいて階層図を作成した。この階層図は、鋼桁を有する橋梁全体を対象として、橋梁を上・下部構造に分類し、それぞれの構造要素に応じた損傷の種類をさらに細分化して関連付けを行った。なお、損傷の分類については、上述の文献⁹⁾によって定義され、実際に橋梁点検に用いられる主な損傷を取り扱っている。次に、AHP適用の第2段階として、階層図に対応した各レベルにおける要素の一対比較値を得ることが必要である。そこで本研究では、学識経験者および橋梁の一般・補修設計等に従事する技術者の計32名と、実際に国道の維持管理に従事している道路管理者48名を対象に、橋梁の維持管理・長寿命化をコンセプトとし、階層図に基づいて各種の比較を行う合計2回のアンケート調査を実施して一対比較を行うための基礎的データを得た。これらの

データから、AHPにおいて一般的に定義された換算値を用いて数値化して個々の要素におけるウエイトを計算し、最終的な総合ウエイトは全体の幾何平均を求めることで得るものである。橋梁点検データの入力に際しては、階層図の要素と同様の損傷が存在した場合は1を、存在しない場合は0をそれぞれ入力し、各データの損傷レベルと掛け合わせることで各橋梁の総合ウエイトを算出する。

3.2 劣化予測による寿命の推定

ここでは、経年変化による構造物の耐力劣化を求めることにより、橋梁構造物が機能停止に至るまでの余寿命を推定する。具体的には、信頼性理論と呼ばれる確率論的手法を用いて橋梁の劣化を推定し、余寿命を算出した。

確率手法に基づく信頼性理論においては、荷重 S と耐力(抵抗力) R がある確率分布に従う、ともに独立な確率変数であるとする。そして構造物が限界状態を超えるのは、荷重が耐力を上回るときであり、その確率は式(1)のように表される。

$$p_f = P(S > R) = P(S - R > 0) \dots \dots \dots (1)$$

式(1)において、 p_f は限界状態を超える確率(破壊確率)である。それぞれの確率変数に対して $R: N(R_0, \sigma_r)$ 、 $S: N(S_0, \sigma_s)$ なる正規分布を考える。さらに、 $Z = R - S$ とみると、 Z も正規分布($Z: N(Z_0, \sigma_z)$)となる。

$$Z: N(Z_0, \sigma_z) = N(R_0 - S_0, \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}) \dots \dots \dots (2)$$

Z は性能関数と呼ばれ、設計上は安全性の余裕を表し、その確率量が問題となる。これは $P(Z < 0)$ なる破壊確率で、次式のように表される。

$$p_f = P(Z < 0) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_0}{\sigma_z}\right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 Φ は平均値0、標準偏差1の標準正規確率分布関数である。次に、平均値 Z_0 が破壊点($Z=0$)から σ_z の何倍隔たっているかを表す信頼性指標 β を定義する。

$$\beta = \frac{Z_0}{\sigma_z} = \frac{R_0 - S_0}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \dots \dots \dots (4)$$

β をこのように定義すると、破壊確率 p_f は次式のように簡潔に示すことができる。

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \dots \dots \dots (5)$$

耐力 R や荷重 S の確率密度関数はいわずに、これらの平均値と分散を用いて破壊確率 p_f を求める方法は二次モーメント法と呼ばれている。この手法では p_f を直接求め

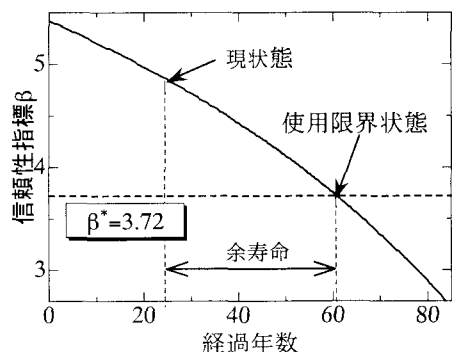


図-2 劣化曲線例

表-1 対象橋梁損傷データ

	損傷(上部)	損傷(下部)
A 橋	地覆(破損)Ⅱ・鋼主桁(塗装劣化)Ⅲ	支承モルタル(ひび割れⅡ)A
B 橋	床版(ひび割れⅢ・遊離石灰Ⅱ)	支承モルタル(破損Ⅲ)・躯体(ひび割れⅢ)
C 橋	鋼主桁(塗装劣化Ⅱ)	抽擁壁(洗掘Ⅱ)A・支承モルタル(破損Ⅲ)P
D 橋	舗装(ひび割れⅢ)・鋼主桁(劣化Ⅱ)・高欄(腐食Ⅲ)	躯体(ひび割れⅢ)A
E 橋	地覆(剥離Ⅲ)・鋼製高欄(腐食Ⅱ)	支承モルタル(ひび割れⅡ)A・躯体(ひび割れⅡ・遊離石灰Ⅱ)A
F 橋	床版(剥離Ⅱ)	躯体(ひび割れⅡ)A

るのではなく、 P_f に対応した信頼性指標 β を用いることにより、簡便に構造部材の安全性を照査することが可能であり、本研究ではこの手法を用いて構造物の劣化予測を行うこととした。解析で得られた図-2 のような β による劣化曲線から、各橋梁において許容信頼性指標 β^* を下回る年数から現時点までの供用年数を引いたものを、対象となる橋梁の余寿命とした。なお、本研究における許容信頼性指標は、 $\beta^*=3.72$ に設定した。劣化を生じさせる主な原因としては、鋼構造物にとって最も重大な問題と考えられる鋼材の腐食に着目し、構造物の耐力の経年劣化を推定した。なお、今回においては、各橋梁の周辺環境による腐食率の違いを考慮して、0.005mm/year、0.010mm/year、0.020mm/year の3種類の腐食率を設定し解析を行った。

3. 3 ユーザーコストの算出

橋梁の維持管理において、ライフサイクルコストを考慮したマネジメントの重要性が高まってきている。一般にライフサイクルコストは、初期建設費、維持・補修工費、あるいは架け替え工費、ならびにユーザーコスト等をすべて含んだものである。しかしながら、既存橋梁の現時点での維持管理・補修補強等を計画する場合、初期投資や架け替えコストを考慮する必要は少ないと考えられ、むしろ工事に伴う交通規制等で失われるであろうユーザーコストを検討項目に加えるべきと思われる。そこで本研究では、現時点における橋梁構造物そのものの価値を、ユーザーコストで代表させることにより、解析パラメータの一つとして扱うこととした。

本研究におけるユーザーコスト算出は、本来、迂回路交通による走行時間の増加の評価以外にも、運輸交通にかかる経済評価、交通事故などの社会的評価等が含まれるが、ここでは最初の迂回路交通による走行時間の増加の評価のみを評価項目として考え、以下のようにそのコストを算出した⁴⁾。

$$UC = \{T_a - T_b\} \times C_{time} \dots \dots \dots (6)$$

ここで上式において UC はユーザーコスト、 T_a は迂回路交通時間、 T_b は通常交通時間、 C_{time} は時間価値として、第11次五箇年計画による53.12(円/分)を用いることにする。また、迂回路の設定及び交通量配分計算、遅れ時間の算定については文献⁴⁾を参考にデータを仮定して行った。

4. 補修橋梁選定シミュレーション

4. 1 解析対象モデル

表-2 A 橋の諸元

形式		連続非合成版桁
支間長		45m
幅員		11.8m
床版厚		22cm
主桁断面	上フランジ	440×22mm
	下フランジ	440×22mm
	ウェブ	2500×9mm

表-3 対象橋梁交通データ

橋梁	迂回路	本線	時間差
A 橋	137.983	78.277	59.706
B 橋	31.875	9.300	22.575
C 橋	355.949	188.183	167.766
D 橋	653.366	428.893	224.473
E 橋	380.659	144.880	235.779
F 橋	110.501	35.880	74.621

本研究における橋梁の維持管理手法について、その適用性を検討するため、ある橋梁群についてその構造緒元、立地条件や損傷等を仮定して、それらの補修順位決定のために DEA による解析を実施する。

本研究において解析対象とした橋梁モデルは6橋であり、いずれも RC 床版を有する鋼桁橋である。対象橋梁の損傷状態として仮定したものを表-1 に示す。なお表中の下部工側の損傷において A は橋台を P は橋脚を表す。今回仮定した鋼橋群の構造物モデルは、一般国道等に架かる中規模の橋梁を想定し、道路橋示方書(平成14年改訂版)⁹⁾に基づき試設計を行った。一例として支間長45m、幅員11.8mの2径間連続5主桁橋であるA橋の諸元を表-2 に示す。また対象橋梁周辺における交通データは、文献⁴⁾を参考として表-3 のように仮定した。

4. 2 補修橋梁選定結果

本研究では表-1～表-3 に示すように仮定された橋梁群において、現状での損傷度、余寿命とユーザーコストの要素解析を行い、その結果を用いて優先補修橋梁の選定を DEA により実施した。DEA による解析における各パラメータの入出力関係は、入力を橋梁損傷度とユーザーコスト、出力を推定された余命と設定し解析を行った。表-4 に解析結果を示す。

表-4 に着目すると、補修優先順位は損傷度に準じている結果となっている。まず、B 橋および F 橋の場合は損傷度が他に比してかなり大きく、ユーザーコストの大小

表-4 DEA 解析結果

橋梁 No.	補修優先順位	D 効率	スラック解		入力データ		改善案	
					単位	値	効率値	差
A	5 位	1.0000	余剰	0.0000	損傷度	0.011	0.011	0.000
			不足	0.0000	ユーザーコスト	380.589	380.589	0.000
			不足	0.0000	余寿命	23	23.000	0.000
B	1 位	0.1561	余剰	0.0000	損傷度	0.097	0.015	-0.082
			不足	0.0004	ユーザーコスト	143.904	143.904	0.000
			不足	0.0000	余寿命	31	31.000	0.000
C	3 位	0.4177	余剰	0.0000	損傷度	0.046	0.019	-0.027
			不足	0.0000	ユーザーコスト	1069.408	1069.408	0.000
			不足	3.38985	余寿命	28	31.390	3.390
D	5 位	1.0000	余剰	0.0000	損傷度	0.026	0.026	0.000
			不足	0.0000	ユーザーコスト	1430.881	1430.881	0.000
			不足	0.0000	余寿命	42	42.000	0.000
E	4 位	0.6739	余剰	0.0000	損傷度	0.040	0.027	-0.013
			不足	0.0000	ユーザーコスト	1502.950	1502.950	0.000
			不足	10.11541	余寿命	34	44.115	10.115
F	2 位	0.3523	余剰	0.0000	損傷度	0.062	0.022	-0.040
			不足	0.0003	ユーザーコスト	475.663	475.663	0.000
			不足	0.0000	余寿命	45	45.000	0.000

や余寿命に関わらず、補修によって損傷度の低減が必要であることが改善案の結果から理解できる。C 橋に関しても、補修を行うことが第一であり、寿命の伸延はわずかで良いことがわかる。それに対して E 橋は、損傷に対する改善は少なくとも、むしろ寿命の延長が効果的であるという結果が得られた。これはユーザーコストが最も大きいため、これを損なうことなく長期間安定的に交通需要を満たすことが改善案として有効であると考えられる。すなわち、ある程度の損傷の範囲内を維持できるのであれば、補修よりも例えば塗装等の通常のメンテナンスを十分に行い、長寿命化を目指すことが望ましいことを示すものであると思われる。また、A 橋と D 橋は D 効率が 1.0 であり改善の必要はないが、その内容は大きく異なっている。A 橋においては寿命は短いものの、損傷、ユーザーコストとも小さく、よって D 効率が 1.0 となったのであろう。D 橋では若干の損傷は有しているが、ユーザーコストが大きく寿命も比較的最長のため、交通需要を満たす方向性が示されていると推定される。

以上の結果より、本研究の手法では、個々の橋梁の特性に応じた具体的な検討が可能となるものと思われ、補修優先順位の意思決定支援等の維持管理システムへの適用性を有するものと期待される。

5. あとがき

以上のように、本研究では AHP を用いた損傷度評価による橋梁構造物の現状把握、信頼性理論に基づいた橋梁構造物の劣化予測による余寿命の推定、ユーザーコスト算出を行い、それらのパラメータに対し DEA 解析を実施することで、橋梁維持管理計画における意思決定プロセスへの適用性および有効性等に関して考察を加えたものである。

解析結果からは、異なる評価方法によって算出した補修の判断要因となる各種パラメータに対して、DEA を用いることで各パラメータの相違点を考慮した補修優先橋梁の選定も可能であることから、本研究の手法は維持管

理システムへの適用の可能性を有していると考えられる。

また、今回は鋼橋を対象として損傷度、余寿命、ユーザーコストの 3 つをパラメータに DEA による補修橋梁の選定を行ったが、補修を考える上でその優先順位に関与すると思われるパラメータは他にも考えられ、それらを考慮することで、技術的側面、経済的側面両方から判断した、より効率的で汎用的な橋梁補修の選定が行えるものと思われる。さらに、劣化予測あるいは現状の損傷度の算定等において、さらに高精度な解析手法を導入すれば、より有効な BMS の構築が可能になるものと推定される。

【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.
- 2) 小幡卓司，濱木道大，林川俊郎，佐藤浩一，宮森保紀：鋼桁橋の維持補修計画支援における AHP の適用性について，鋼構造年次論文報告集，第 8 巻，pp.697-704，2000.
- 3) 小幡卓司，倉戸亮，林川俊郎，佐藤浩一，井田俊輔：鋼橋の劣化度予測における信頼性解析の適用について，土木学会北海道支部論文報告集，第 60 号，2004（印刷中）
- 4) 杉本博之，首藤諭，後藤晃，田村亨：橋梁のユーザーコスト算定に関する一考察，土木学会北海道支部論文報告集，第 56 号，2000，pp.282-287
- 5) 刀根薫：経営効率性の測定と改善—包絡分析法 DEA による—，日科技連出版社，1993
- 6) 今野浩：線形計画法，日科技連出版社，1987.
- 7) 建設省土木研究所：橋梁点検要項（案），土木研究所資料，第 2651 号，1998.
- 8) 北海道開発局道路維持課：道路橋の点検および補修・補強設計施工要領（案），1998.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，II 鋼橋編，2002.