

鋼橋の損傷度・余寿命・ユーザーコストと現在価値を考慮した BMS の構築

Study on establishment of BMS in consideration of damage level, life expectancy, user cost and the value of bridge structures

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡 卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学工学部土木工学科 学生員 キム テッサン (Taeksang Kim)
 北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1. まえがき

日本における交通社会資本の整備は、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り、これらの構造物の老朽化は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、近年の市民意識等の向上により、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、投資余力の減少から、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り、既設の交通社会資本の有効利用・維持管理が一層重要視されている。このような社会情勢の中で、橋梁構造物の現況に着目すると、車両の大型化、予想外の交通量増大等の影響を強く受け、種々の損傷が発生している可能性が高いと考えられる¹⁾。よって、今後は維持管理を強化し、必要に応じて補修・補強を実施して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うためには、構造物の損傷状態や今後予測される劣化状況の把握などの技術的な面の他、LCC 等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を考慮する必要があると考えられる。また、情報公開等の観点から、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と思われる。すなわち、上述の市民の意識向上に伴い、十分な説明責任を果たすことが可能であり、かつ数学的な特別な知識等を必要とせずとも判定が可能となる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、対象橋梁のユーザーコストならびに橋梁の現在価値を算出し、これらの異なるパラメータを包絡分析法 (Data Envelopment Analysis、以下 DEA と称す) 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。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、工学あるいは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。

具体的には、ある管理管内における橋梁群を仮定し、各橋梁に対する階層分析法 (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、補修を行わない場合の各橋梁の余寿命³⁾、周辺の交通状況等からユーザーコストを算出し⁴⁾、さらに、供用中の構造物を現在において再建設するためのコストを現在価値として、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適用性および有効性等に関して検討を試みる。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支援としての適用性および有効性等に関して考察を加えたので、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)

効率的な橋梁の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。このパラメータは、現状の損傷状態をはじめとして、今後の劣化状況や LCC 等の経済的な面など、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。従来この種の研究では、主に損傷度や LCC の検討等を主体に行われることが多く、複数のパラメータを同時に取り扱った研究は著者らの知る限りでは非常に少ない。そこで本研究では、橋梁維持管理の判断材料と考えられるパラメータを設定し、DEA 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出した。

DEA は、一般に 2 段階線形計画問題 (LP) に帰着し、制約条件の相違によって各種モデルが与えられる。最も基本的なモデルである CCR モデルは、以下のような LP を解くことにより所定の解が得られる^{5),6)}。

$$\left. \begin{array}{l} \text{第 1 目的関数} \quad \min \theta \\ \text{第 2 目的関数} \quad \min -es_x - es_y \\ \theta \mathbf{x}_0 = \mathbf{X}\lambda + s_x \\ \text{制約条件} \quad \mathbf{y}_0 = \mathbf{Y}\lambda - s_y \\ \theta \geq 0 \quad \lambda \geq 0 \quad s_x \geq 0 \quad s_y \geq 0 \end{array} \right\} \dots (1)$$

ここで、 θ は対象とする問題の効率値であり、D 効率と称する。 \mathbf{X}, \mathbf{Y} は各活動等の入出力、 λ は各活動に対する最適解となり、優位集合とその度合いを表す。また s_x および s_y は、スラック解と呼ばれ、それぞれ入力之余剰、出力の不足を表す変数である。さらに、上記の LP の解から得られる最適基底から、入力への最適ウエイト v と出力への最適ウエイト u が算出される。この LP の解において、最適解 (λ, s_x, s_y) を最大スラック解と呼ぶ。この最大スラック解において、 $s_x=0, s_y=0$ を満たす活動をスラックレス活動という。また、最適解 $(\theta, \lambda, s_x, s_y)$ において、 $\theta=1$ かつスラックレスであるとき、その活動は効率的であり、それ以外のとき非効率的であると定義される。なお、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上述の CCR モデルにより解析を行うこととした。

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、本章の要素解析技術で述べる、AHP を用いた橋梁の損傷度、信頼性理論に基づく余寿命、ユーザーコストならびに現在価値をそれぞれ算出し、それらを DEA における入出力データとして与えることで解析を実施し、各橋梁の D 効率値を算出した。本研究においては、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。

3. 要素解析技術

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。意志決定においては対象の問題が存在し、最終的な選択となる代替案、それを絞り込むための評価基準を用いて比較を行って、何らかの判断を行うものである。AHP では、これら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、比率尺度による評価を行うものである。AHP における比率尺度の求め方は、 n 個の評価項目 $I_1 \sim I_n$ が存在し、そのウエイトが $w_1 \sim w_n$ と仮定した場合、項目 I_i の I_j に対する重要度の一対比較値は式(2)で与えられ、全体の一対比較マトリックス A は式(3)ようになる。

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \dots \dots \dots (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \dots \dots (3)$$

ここで、式(3)の右側からウエイトベクトル $w^T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ を乗じると、

$$Aw = \lambda_{\max} w \dots \dots \dots (4)$$

となる。式(4)から、ウエイトベクトル w は一対比較マトリックス A の固有ベクトルであり、 n は A の最大固有値 λ_{\max} となっていることがわかる。よって、各評価項目間の比較検討により一対比較マトリックス A を求め、その固有ベクトルを計算することにより各評価項目のウエイトを得ることができ、代替案における各ウエイトの積を求めることによって最終的な結果が算定される。また、AHP の特徴として、全体を通しての判断の整合性に関しても検討可能である。本研究では、旧建設省土木研究所による「橋梁点検要領(案)」と、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、各構造要素に応じた損傷の種類を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⁸⁾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。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と、実際に国道の維持管理に従事する道路管理者を対象に、橋梁の維持管理・長寿命化に関するアンケート調査に基づき、AHP における一対比較を行った²⁾。これらのデータから、AHP において定義された換算値によっ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によって得た。橋梁点検データの入力、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を入力し、各データの損傷レベルの積を求めることで各橋梁の総合ウエイトを算出し、これを現状における損傷度として用いることとした。

3.2 劣化予測による余寿命の推定

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は、荷重 S と耐力(抵抗力) R がある確率分布に従う共に独立な確率変数であるとする。構造物が限界状態を超えるのは、荷重が耐力を上回る場合であり、その確率は式(5)のように表される。

$$P_f \equiv P(S > R) = P(S - R > 0) \dots \dots (5)$$

式(5)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 $R : N(R_0, \sigma_r)$ 、 $S : N$

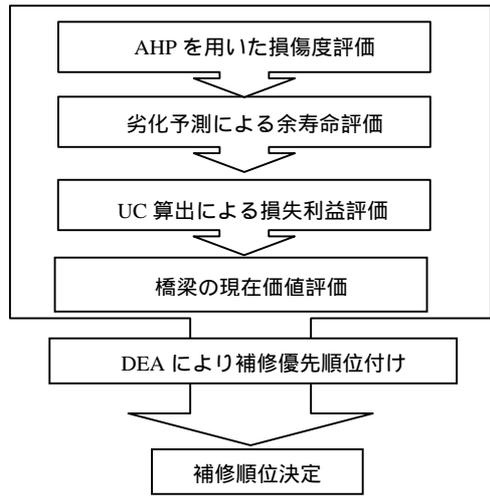


図-1 BMS 全体像

(S_0, σ_s) なる正規分布を考える。ここで、 R_0, S_0 は平均値、 σ_r, σ_s は分散である。さらに、 $Z = R - S$ とおくと、 Z も正規分布 ($Z : N(Z_0, \sigma_z)$) となる。

$$Z : N(Z_0, \sigma_z) = N(R_0 - S_0, \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}) \dots \dots (6)$$

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。

$$P_f = P(Z < 0) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_0}{\sigma_z}\right) \dots \dots (7)$$

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。

$$\beta = \frac{Z_0}{\sigma_z} = \frac{R_0 - S_0}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \dots \dots (8)$$

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。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \dots \dots (9)$$

耐力 R や荷重 S の確率密度関数はいずれに、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 を直接求めずに、 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の照査が可能であり、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。

鋼構造物の経年劣化に関わる要因としては、腐食、疲労に起因する損傷からの剛性低下、材料そのものの劣化など多数挙げられる。昭和 61 年から平成 8 年までの 10 年間の鋼橋の架け替えに関するデータによると、架け替えの理由としては線形や機能上の改良が大部分を占めており、続いて上部構造の損傷が 12% となっている⁹⁾。この上部構造の架け替え理由の内訳は、鋼材の腐食が 26% を占めており、腐食は鋼構造物にとって最も重大な問題の一つであると考えられる。したがって本研究では、鋼材の腐食に着目して構造物の耐力の経年劣化を考えることとした。構造部材の耐力が環境要因によってのみ経年劣化する場合、時刻 t における部材耐力 $r(t)$ は次式のように表される¹⁰⁾。

$$r(t) = r_0 \cdot g(t) \dots \dots (10)$$

ここで、 r_0 は初期の部材耐力、 $g(t)$ は劣化関数である。劣化関数とは、腐食など環境要因により劣化する耐力の経年変化を考慮した関数であり、一般に次式のようにモデル化することができる¹¹⁾。

$$g(t) = 1 - a \cdot (t - T_1)^b \cdot \dots \cdot (11)$$

ここで、 T_1 は劣化の開始時刻、 a は劣化の進行速度を表わすパラメータ、 b は劣化の原因となる環境要因に依存するパラメータである。本研究では、 $T_1=0$ 、 $b=1.0$ と設定した。また劣化の進行速度 a に起因する腐食の進行速度の目安としては、普通の鋼材を大気中に放置した場合、穏やかな環境下では 0.05mm/year、海岸地域などの厳しい環境下では 0.2 mm/year に達する¹²⁾。解析で得られた 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定義した。なお、本研究における許容信頼性指標は、 $\beta^*=3.72$ (破壊確率 10^{-4}) に設定した。

3.3 ユーザーコストの算出

一般に、LCC とは、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においては、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が、管理計画に大きく影響を及ぼすものと思われる。そこで本研究では、工事等に伴う通行止めによって失われる交通行動に基づくコストを、ユーザーコストとして解析パラメータに加えることとした。

本研究におけるユーザーコスト算出は、交通ネットワークモデルを構築し、ある橋梁が使用不可となった場合の迂回路交通による走行時間と交通量の変化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⁾。

$$UC = \left\{ \sum_{i=1}^n (t_{ai} \times q_{ai} - t_{bi} \times q_{bi}) \right\} \times N \times C_{time} \cdot \dots (12)$$

上式において UC はユーザーコスト、 t_{ai} は対象の橋梁が通行不能時のリンク i の所要時間、 q_{ai} はその場合のリンクの交通量、 t_{bi} は通常交通時間、 q_{bi} は通常交通量、 N は乗用車の平均乗車人数 1.34 (人/台)、 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。本研究では計算の単純化のために道路ネットワークを通行するものを乗用車のみと仮定した。

また、各リンクの交通量と所要時間を推定するために OD 交通量、Q-V 曲線を用いて OD 交通量の分割配分を行った。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た。今回はノード数 7、リンク数 12 のネットワークを仮定し、6 つのゾーン間の OD 交通量を仮定して解析を行った。表-1 に今回用いた対象橋梁の交通データを示す。

3.4 橋梁の現在価値

前にも述べたとおり、一般に LCC には、初期投資費用や掛け替え費用が含まれていることは周知の事実である。しかしながら、現状の構造物を評価する場合、長期間にわたる年月の経過により貨幣価値は大きく変化し、社会的割引率に関する議論も行われてはいるが、その構造物の建設時点での現在における価値を正確に算出することは困難である。そこで本研究は、構造物の現在価値を、今の時点で再建設するにはどの程度の初期投資が必要になるかを求め、その構造物の現在価値として用いることとした。

具体的な算出方法としては、ほぼ同様の断面緒元を用いる参考文献¹⁴⁾のデータに基づいて算出した単位長さあたりの単価に対象橋梁の橋長を掛けた値を現在価値として用いることにした。橋梁再建設にかかるであろう費用を算出することによって橋梁の存在価値を示すことができると考えられる。

表-1 対象橋梁交通データ

橋梁	$\sum t_{ai} \times q_{ai}$	$\sum t_{bi} \times q_{bi}$	差
A 橋	39.907	23.279	16.628
B 橋	27.203		3.924
C 橋	30.291		7.012
D 橋	24.641		1.362
E 橋	38.662		15.383
F 橋	31.956		8.677

表-2 対象橋梁損傷データ

損傷 (上部)	
A 橋	地覆(破損)・鋼主桁(塗装劣化)
B 橋	床版(ひび割れ・遊離石灰)
C 橋	鋼主桁(塗装劣化)
D 橋	舗装(ひび割れ)・鋼主桁(劣化)・高欄(腐食)
E 橋	地覆(剥離)・鋼製高欄(腐食)
F 橋	床版(剥離)

損傷 (下部)	
A 橋	支承モルタル(ひび割れ)A
B 橋	支承モルタル(破損)・躯体(ひび割れ)
C 橋	抽擁壁(洗掘)A・支承モルタル(破損)P
D 橋	躯体(ひび割れ)A
E 橋	支承モルタル(ひび割れ)A・躯体(ひび割れ・遊離石灰)A
F 橋	躯体(ひび割れ)A

表-3 橋梁の形式と腐食率・供用年数

橋梁	構造形式	腐食率 (mm/year)	供用年数
A 橋	2 径間 5 主桁	0.05	30
B 橋	3 径間 5 主桁	0.05	39
C 橋	2 径間 4 主桁	0.10	32
D 橋	3 径間 4 主桁	0.05	36
E 橋	2 径間 5 主桁	0.15	28
F 橋	3 径間 5 主桁	0.10	28

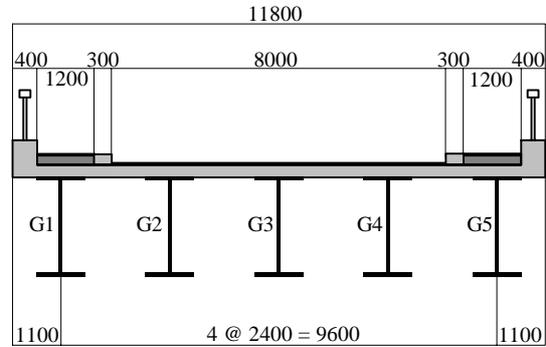


図-2 2 径間 5 主桁断面図(mm)

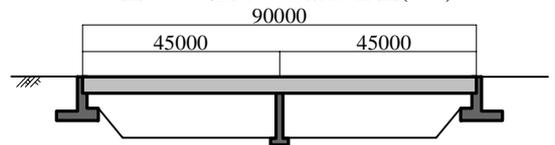


図-3 2 径間 5 主桁側面図(mm)

4 . 補修橋梁選定シミュレーション

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 床版を有する鋼鉄桁橋である。対象橋梁の損傷状態として仮定したものを表-2 に示す。なお表中の

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	6 位	1.0000	余剰	0.0000	損傷度	0.011	0.011	0.000
			不足	0.0000	現在価値	201.43	201.43	0.000
			不足	0.0000	ユーザーコスト	2840.59	2840.59	0.000
			不足	0.0000	余寿命	23	23.00	0.000
B	1 位	0.1528	余剰	0.0000	損傷度	0.097	0.0148	-0.0822
			不足	50.64	現在価値	220.85	84.40	-136.45
			不足	1892.29	ユーザーコスト	1936.33	2188.16	251.83
			不足	0.0000	余寿命	31	31.00	0.000
C	2 位	0.2911	余剰	0.0000	損傷度	0.046	0.0134	-0.0326
			不足	82.95	現在価値	162.27	130.19	-32.08
			不足	1301.98	ユーザーコスト	2156.13	1929.63	-226.50
			不足	0.0000	余寿命	28	28.00	0.000
D	5 位	0.7726	余剰	0.0000	損傷度	0.026	0.020	-0.006
			不足	166.96	現在価値	200.87	322.15	121.28
			不足	3433.20	ユーザーコスト	1753.96	4788.31	3134.35
			不足	0.0000	余寿命	42	42.00	0.000
E	4 位	0.4065	余剰	0.0000	損傷度	0.040	0.0162	-0.0237
			不足	146.68	現在価値	151.09	208.10	57.01
			不足	1447.17	ユーザーコスト	2751.96	2565.84	-186.12
			不足	0.0000	余寿命	34	34.00	0.000
F	3 位	0.3471	余剰	0.0000	損傷度	0.062	0.0215	-0.0405
			不足	202.05	現在価値	192.05	268.72	76.67
			不足	3282.98	ユーザーコスト	2274.69	4072.53	1797.84
			不足	0.0000	余寿命	45	45.00	0.000

下部工の損傷での A は橋台を、P は橋脚である。今回仮定した鋼橋群のモデルは、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）¹³⁾に基づき試設計を行った。各橋梁の構造形式と周辺環境を考慮した各橋梁の腐食率をと供用年数を表-3 に、一例として支間長 45m、幅員 11.8m の 2 径間連続 5 主桁橋の断面図と側面図を図-2、図-3 に示す。

上記のように算定された 4 種類のパラメータにおいて損傷度を入力とし、出力はユーザーコスト、余寿命および現在価値に設定して、DEA による解析より得られた D 効率値の低い橋梁から改善の必要な橋梁と順位付けた。解析結果を表-4 に示す。今回の解析結果では全橋を通じて、損傷度が大きい橋梁が補修順位の上位にくる傾向が強くなり、よって改善案として損傷度を小さくする案が全体的に他のパラメータを改善するよりも効果的であるという結果が得られた。また、損傷度が比較的小さくても、ユーザーコストの値も大きければ、D 効率の値も高くなっていったことから、ユーザーコストもパラメータとして重要な評価要素のひとつであると考えられる。

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、信頼性理論に基づいた劣化予測による余寿命の推定、ユーザーコストならびに現在価値の算定を行い、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支援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、現状での損傷度が大きい橋梁ほど補修順位が高くなる傾向が確認され、また、ユーザーコストが大きい場合にも D 効率が上昇することから、これも維持管理における重要なパラメータであると考えられる。

今後の予定としては、例えば最も効率性の劣る橋梁のパラメータを変化させて感度解析を行い、各パラメータ毎の影響を検討する必要がある。さらに、実際の道路ネットワークのデータを用いた解析を行って、本研究の実用性・有効性等の検証を実施することが重要であると思われる。

なお、本研究の一部に日本鉄鋼連盟 2005 年度「鋼構造研究・教育助成事業」による一般研究助成（代表研究者：小幡卓司）の援助を受けたことを付記する。

【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.
- 2) 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.
- 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，pp.258-261，2004.
- 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) 西川和廣，村越潤，上仙靖：橋梁架替に関する調査結果（），土木研究所資料第3512号，1997-10
- 10) Mori, Y. and Ellingwood, B. : Reliability-Based Service-Life Assessment of Aging Concrete Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.5, pp1600-1621, 1993.
- 11) Clifton, J. R. and Knab, L. I., : Service life of concrete, National Bureau of Standards, NUREG/CR5466, 1989.
- 12) 大井謙一：鉄骨造について，建築雑誌，Vol.117，no. 1494，pp.18-19，2002.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編，鋼橋編，2002.
- 14) 小幡卓司，大野良輔，高田詞之，林川俊郎，佐藤浩一：鋼橋の建設時における環境負荷に関する定量的評価とその対策 鋼構造年次論文報告集第 11 巻，pp193-198，2003.