

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

Study on applicability of super data envelopment analysis for BMS in consideration of many parameters

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 佐藤 圭太 (Keita Sato)

1. まえがき

わが国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、その充実が図られてきた。それから約 35 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。よって、近年で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方向になりつつあるが、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・技術者倫理等の観点から、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。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と考えられる^{1),2)}。

以上より、本研究では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（以下 U.C と称す）ならびに橋梁の現在における再建設費用を算出し、これらの異なるパラメータを包絡分析法（Data Envelopment Analysis、以下 DEA）および、超包絡分析法（以下 SDEA）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。

ここで、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。ただし、DEA では効率性が最も高いと判定される活動が複数算定される場合があり、このような際には DEA において真に正しい解が得られているかどうか判然としないこともしばしばある。これを解決する手法として、DEA で得られた複数の最も優れた活動をそれぞれ分離して繰り返し計算を実施して、真の効率性を求める SDEA と呼ばれる手法が有効であることが知られている³⁾。

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⁴⁾、周辺の交通状況等から U.C を算出し⁵⁾、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換算価値として、これらのパラメータに対し DEA 解析、SDEA 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. BMS における DEA および SDEA の適用

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。従来のこの種の研究では、主に 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定した。

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^{6),7)}。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{第 1 目的関数} & \min \theta \\ \text{第 2 目的関数} & \min -es_x - es_y \\ & \theta x_0 = X\lambda + s_x \\ \text{制約条件} & y_0 = Y\lambda - s_y \\ & \theta \geq 0 \quad \lambda \geq 0 \quad s_x \geq 0 \quad s_y \geq 0 \end{array} \right\} \dots (1)$$

ここで、 θ は対象とする問題の効率値であり、D 効率値と称する。 X, 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、入力への最適ウェイト v と出力への最適ウェイト 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。図-1 は CCR モデルによる解析を 1 入力 2 出力で行った場合の概略的な図解例である。

図-1 における縦軸および横軸は、一つの活動における二つの出力値をそれぞれ入力値で割った値を用いており、これらをプロットすることによって表現した。ここで D 効率値が 1 の活動を結んだ包絡線を効率的フロンティアと称する。フロンティア上にない点の D 効率値は、対象となる点(A)と原点(O)を結んだ直線とフロンティアとの交

点(P)による比、OA/OP で表される。

本研究で考える橋梁維持管理システムにおいては、維持管理の判断材料となるものとして、次章の要素解析技術で述べる、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における再建設費用をそれぞれ算出し、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 効率値の高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。

しかしながらこの方法では D 効率値が 1 の橋梁、つまり優先順位が 1 位となる橋梁が複数生じる場合がある。ここで SDEA を適用する。SDEA では図-2 のように図解を用いて、D 効率値が 1 の活動のうち一つを取り除き、再度フロンティアの構築を行う。ここで、フロンティア上では D 効率値が 1 であることを利用し、OA/OP (≥ 1) により D 効率値を定める。その後対象データを戻し、他のフロンティア上のデータを取り除き、繰り返し計算を行うことでフロンティア上の活動の優劣を決定することができる。

3. 要素解析技術

3.1 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⁸⁾。

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(2)のように表される。

$$p_f \equiv P(S > R) = P(S - R > 0) \dots (2)$$

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 $R: N(R_0, \sigma_r)$ 、 $S: N(S_0, \sigma_s)$ 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。

$$Z: N(Z_0, \sigma_z) = N(R_0 - S_0, \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}) \dots (3)$$

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。

$$p_f = P(Z < 0) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_0}{\sigma_z}\right) \dots (4)$$

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。

$$\beta \equiv \frac{Z_0}{\sigma_z} = \frac{R_0 - S_0}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \dots (5)$$

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。

出力 1/入力

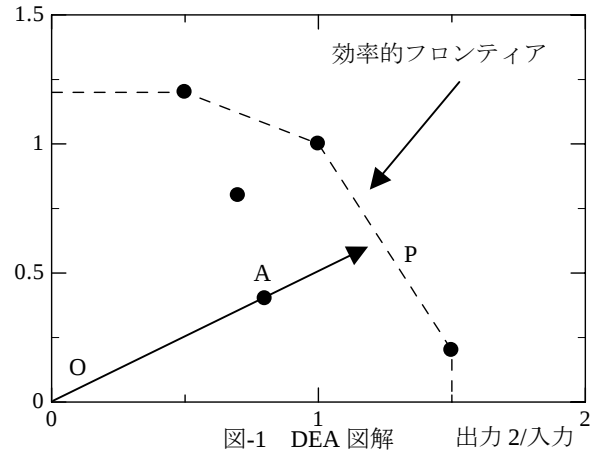


図-1 DEA 図解

出力 1/入力

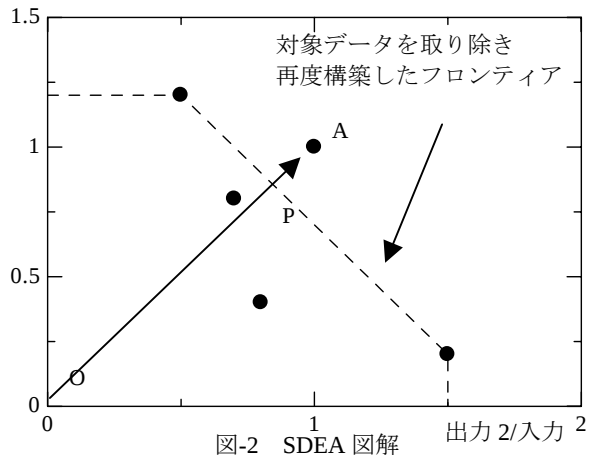


図-2 SDEA 図解

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \dots (6)$$

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 年間で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⁾。

$$r(t) = r_0 \cdot g(t) \dots (7)$$

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⁾。

$$g(t)=1-a \cdot (t-T_l)^b \cdots \cdots (8)$$

ここで、 T_l 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、 $T_l=0$ 、 $b=1.0$ 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 0.2mm/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。

3.2 ユーザーコスト (U.C) 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 U.C 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 U.C 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、U.C 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 U.C 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⁾。

$$UC = \left\{ \sum_{i=1}^n (t_{ai} \times q_{ai} - t_{bi} \times q_{bi}) \right\} \times N \times C_{time} \cdots (9)$$

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 43、リンク数 70 のネットワークを仮定し、それぞれのゾーン間の OD 交通量を仮定して解析を行った。

3.3 現在における再建設費用

前述のとおり、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おり、国土交通省では当面 4% を用いることも決められているが、対象となる橋梁群の個々の建設時期はまちまちであり、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、構造物の現時点における価値を、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、その構造物の現在における再建設費用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における再

表-1 構造形式と構造ケース

橋梁	橋長 (m)	構造形式	腐食率 (mm/year)	供用年数
A 橋	62	2 径間 4 主桁	0.050	33
B 橋	70	2 径間 5 主桁	0.150	21
C 橋	66	2 径間 4 主桁	0.100	15
D 橋	105	3 径間 5 主桁	0.100	19
E 橋	96	3 径間 4 主桁	0.050	35
F 橋	90	3 径間 4 主桁	0.100	17
G 橋	70	2 径間 5 主桁	0.050	45
H 橋	96	3 径間 5 主桁	0.150	12
I 橋	102	3 径間 5 主桁	0.050	31

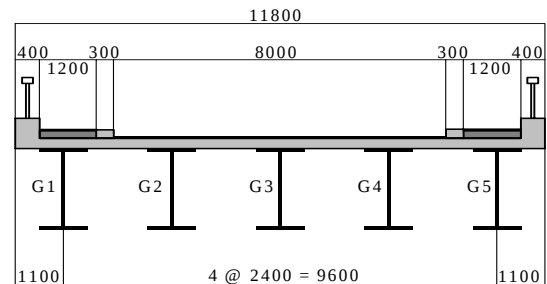


図-3 2径間5主桁断面図(mm)

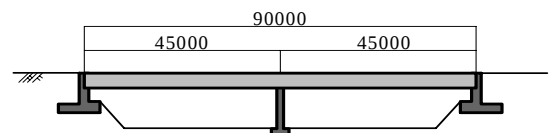


図-4 2径間5主桁側面図(mm)

建設費用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、個々の橋梁の現時点における価値を示すことができると考えられる。

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 9 橋であり、いずれも RC 床版を有する鋼鈑桁橋である。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と供用年数を表-1 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-3、図-4 に示す。

上記のように算定された 3 種類のパラメータにおいて余寿命を入力とし、出力は U.C および再建設費用に設定して、DEA による解析より得られた D 効率値の高い橋梁から改善の必要な橋梁と順位付けた。解析結果を図-5 に示す。今回の解析結果では D 効率値が 1 の橋梁が 2 橋あったため、さらに、それぞれの橋梁の出力値である再建設費用、U.C を入力値の余寿命で割った値を縦軸および横軸に設定し、SDEA による解析を行った。特筆する点としては、フロンティア上になかった H 橋がフロンティア上の点だった B 橋よりも上位になったことである。これは DEA 自体が各々の最も有利な条件での相対比較であり、SDEA によって、DEA での 1 位を除外した集合内では、1 位に隠れた下位の活動のほうが、フロンティア上の他の活動よりも優先度が高い可能性があるということを示唆していると

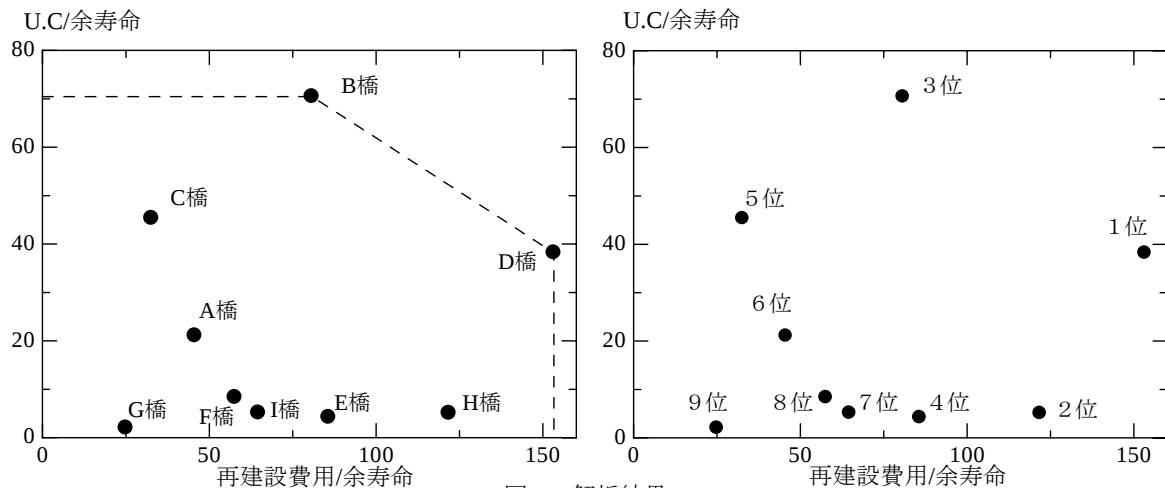


図-5 解析結果

思われる。

また、全橋を通じて、出力の U.C. 及び再建設費用が大きいほど、また、入力の前寿命が小さいほど D 効率値が大きくなる傾向にあり、U.C. が比較的小さくても再建設費用が大きければ優先順位が高くなっていることから、再建設費用も重要なパラメータであることがわかる。

5. あとがき

以上のように、本研究では信頼性理論に基づいた劣化予測による前寿命の推定、ユーザーコストならびに現在における再建設費用の算定を行い、それらのパラメータに対し DEA 解析・SDEA 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、再建設費用、U.C. が大きい、また前寿命が小さい橋梁ほど補修順位が高くなる傾向が確認された。すなわち、再建設費用、および U.C. の大きいものほど架け替えが困難であることから、維持管理において重要なパラメータであると考えられる。また、SDEA 解析において、DEA 解析での 1 位に隠れた下位の橋梁のほうが、他のフロンティア上の橋梁よりも優先度が高くなる可能性があることが判明し、効率的な活動が複数存在するとき、一概に DEA 解析による D 効率値だけで判断することは、真の効率性を検討する上で不適当と思われる結果が得られた。

今後の予定としては、例えば最も効率性の優れた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。また、他のパラメータ、例えば橋梁点検データによる損傷度評価などの要素を増やして、D 効率値の変化を検証し、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。

【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) 古川 浩平，大石 博之：DEA（包絡分析法）を用いた土砂災害警戒区域調査箇所の優先度設定，講演会発表資料，2006.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 今野浩：線形計画法，日科技連出版社，1987.
- 8) 小幡卓司，倉戸 亮，林川俊郎，宮森保紀：鋼橋の損傷度・前寿命と UC を考慮した BMS 構築に関する研究鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，2004.11，pp.365-370
- 9) 西川和廣，村越潤，上仙靖：橋梁架替に関する調査結果(III)，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, pp.1600-1621, 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 I 共通編，II 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，pp.193-198, 2003.