

DEA を用いた橋梁構造物の環境負荷に関する定量的評価法について

Study on Quantitative Assessment of Environmental Impact on Bridge Structures by using of Data Envelopment Analysis

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 高田詞之 (Noriyuki Takada)
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)
北海道大学大学院工学研究科 学生員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)

1. まえがき

近年においては、人間の生産活動等による地球規模の環境破壊が大きな社会問題となりつつある。中でも地球温暖化は、産業革命以降における二酸化炭素等の温室効果ガス濃度の急激な増加によって極めて深刻な状況となっており、仮に無対策のまま経過すれば、100 年後には平均気温が 2℃、海面が 50cm 上昇すると予測されている¹⁾。この地球温暖化問題に対処するため、気候変動に関する国際連合枠組条約締約国会議(COP)において、温室効果ガス排出量削減の具体的な数値目標を定めようとする動きは周知の事実である。我が国における温室効果ガス排出量は世界第 4 位と非常に多く、その中で建設部門が我が国における CO₂ 排出量、エネルギー消費量に占める割合は、それぞれ約 24%、19%に達している。あらゆる生産活動が環境への配慮を必要とする 21 世紀においては、橋梁等の社会基盤施設整備に関しても、その建設・維持管理等のライフサイクル全般における環境負荷低減への努力を進めることが極めて重要であると考えられる。

一般に、橋梁構造物は鋼・コンクリート等の材料を複合的に使用し、上部構造および下部構造からなる構造システムと考えることができる。従来の基盤整備では、専ら建設時のコストを最小にすることが問題とされ、それに応じて材料、径間割(橋脚数)、上部構造形式等が決定されていたが、上述の通り、今後は 100 年程度のライフサイクルの中でコストの上昇をある程度抑制しながらも、環境に対する影響を重要視するような橋梁システムの整備を進めることが必要であると思われる。この地球温暖化に関わる環境負荷を軽減するには、まず建設時における材料製造、上部工製作・架設、下部工建設におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量の低減の実現のみならず、さらには長寿命化、ミニマムメンテナンス化、リサイクル性の向上による産業廃棄物の削減を目指すことが大きな課題である。これらを実現することで、温暖化抑止のための環境問題への本格的な対応が可能となり、後世への有効な社会資本の充実に向けた新たな橋梁システムの開発が可能になるものと考えられる。

以上の観点から、鋼橋あるいは RC・PC 橋等を対象として、主に CO₂ 排出量およびエネルギー消費量をパラメータとした橋梁形式毎の環境負荷に関する研究が盛んになされている^{1~4)}。その結果、例えば鋼橋においては、原材料の生産に比較的多くのエネルギー消費と CO₂ 排出を必要とするものの、リサイクル性は高く、従来型の多主桁橋よりも少数主桁橋の方が環境負荷に対しては優れた特性を有していると言われている。また、コンクリート橋は、エネルギー消費量と CO₂ 排出量は鋼橋に比して優れているが、現状の技術では十分なリサイクルが困難であり、取り壊し時に産業廃棄物を多く排出する傾向にあることが示

されている。しかしながら、従来のこの種の研究は、試設計から得られた材料重量あるいは製作・施工等の工数に、原単価を掛け合わせて環境負荷パラメータを算出し検討を加えるものが大半であり、例えばエネルギー消費量等の、どのパラメータをどの程度改善すれば十分な環境負荷の低減が実現できるのか、具体的な数値で示された例は著者らの知る限りにおいては皆無である。

一方、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、何らかの比例尺度を用いて定量的な相対比較を行うことは、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。中でも、抱絡分析法(Data Envelopment Analysis、以下 DEA と称す)は、比較の対象としたいいくつかの活動あるいは事業の中で、ある 1 つの活動が非効率的と判定された際に、それが他に比してどの程度劣るか、あるいはどの点を改善すれば効率的になるかを具体的に検討できることから近年注目されている⁵⁾。すなわち、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。

そこで本研究においては、鋼およびコンクリートを材料とした橋梁システムについて、CO₂ 排出量等のデータをパラメータとして DEA による効率性ならびに改善案の解析を行って、各パラメータの影響を定量的に求めることにより、環境負荷低減を目指した橋梁構造物のあり方に関する、基礎的な検討を試みることを目的とする。具体的には、文献 2 における橋長 150m の橋梁 6 種類ならびに少数主桁橋梁を対象に、まず建設時におけるエネルギー消費量、CO₂ 排出量、工費等を用いて予備的な解析を実施して、DEA における入出力関係について検討を加える。次に、上記で得られた結果を踏まえ、リサイクル材の使用あるいは使用材料そのものに応じたリサイクル率、供用期間(寿命)等をパラメータに加えることにより、これらを考慮した場合の各橋梁における効率性の変化、あるいは入出力の改善案に基づいた実現可能性等に関して考察を試みる。

以上より、本研究ではこれらの解析結果を通じて、このような社会基盤施設が及ぼす環境負荷に関しての定量的評価に対する、DEA の適用性あるいは妥当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. 解析手法

2.1 抱絡分析法(DEA)

前述のように、本研究では橋梁システムの環境負荷の効率性解析に抱絡分析法(DEA)を用いることとした。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、比例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。例えば、表-1のような2入力、1出力の活動において、入力1/出力、入力2/出力を座標軸としてグラフ上にプロットすると図-1が得られる。効率性を考えた場合、少ない入力で所定の出力が得られている活動ほど優れていると考えることができるため、点C,D,Eを通り、さらにCから水平に伸びる線とEから垂直に伸びる線を考慮すると、すべてのデータはこの線で囲まれる領域に含まれることになる。DEAにおいてはこの線を効率的フロンティアと称し、またフロンティア線に囲まれる領域を生産可能集合(領域)と呼ぶ。ここで、効率的フロンティア上の効率値は1に、線上にない活動の効率値は1以下になるが、その値はフロンティア線をもとに求めることができる。活動Aの場合、図-2のように原点と点Aを結ぶ線がフロンティア線DEと交わる点をPとすれば、 $OP/OA=0.8571$

としてAの効率値を得ることができる。非効率性の改善についても、図-2のように入力1と入力2をP点まで減らす、入力2のみを減少させて点Dに移動させる、あるいは入力2はそのまま入力1を減少させる点A₁への移動等、線分DA₁上であればどの点に移しても結果は改善されることがわかる。以上のように、効率値が1となる活動が複数となり、改善案もいくつかの方法が提案できることから、多基準型かつ個々の活動の多様性を踏まえた上での効率性評価手法であると考えられる。

一般に、CCRモデルを用いたDEAの計算は次のような2段階線形計画問題(LP)に帰着する^{5,6)}。

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

ここで、 θ は対象とする問題の効率値であり、一般にD効率と称する。 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を解くことによって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。

上述の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言う。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、それ以外るとき非効率であると定義される。例えば、表-1に示されるような活動に対して、CCRモデルの解を求めると、活動Aに対するLPの最適解は、

$$\begin{aligned} \theta &= 0.8571 \\ \lambda_1 &= \lambda_2 = \lambda_3 = 0, \quad \lambda_4 = 0.7143, \quad \lambda_5 = 0.2857, \quad \lambda_6 = \lambda_7 = 0 \\ s_{x1} &= s_{x2} = s_y = 0 \\ v_1 &= 0.1429, \quad v_2 = 0.1429, \quad u = 0.8571 \end{aligned}$$

表-1 2入力、1出力の例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
入力1	4	7	8	4	2	5	6	5.5	6
入力2	3	3	1	2	4	2	4	2.5	2.5
出力	1	1	1	1	1	1	1	1	1

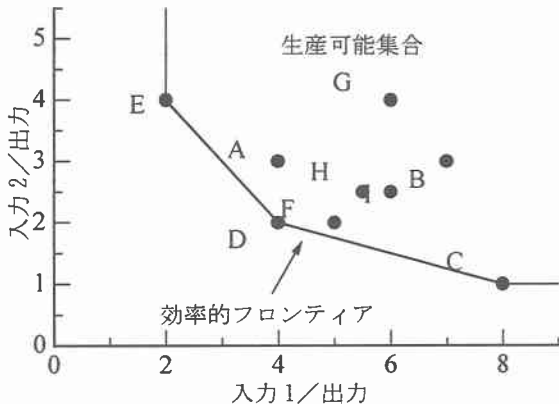


図-1 2入力1出力の例

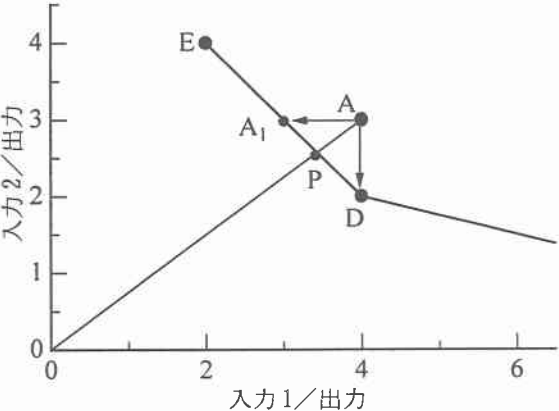


図-2 点Aの改善

となり、 $\lambda_4 > 0, \lambda_5 > 0$ であるから、活動Aに対する優位集合は $E_A = \{D, E\}$ となることがわかる。この優位集合と λ の値をもとにAの入出力は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} 0.8571 \times (\text{Aの入力}) &= \\ 0.7143 \times (\text{Dの入力}) + 0.2857 \times (\text{Eの入力}) &\dots (2) \\ (\text{Aの出力}) &= \\ 0.7143 \times (\text{Dの出力}) + 0.2857 \times (\text{Eの出力}) &\dots (3) \end{aligned}$$

これらの係数から、それぞれの活動を効率的にするには、入出力をどのように改善すれば有効であるか、比較的容易に判断することが可能となる。これらのプロセスに関して、本研究ではMATRAB R12.1を用いてプログラミングを実施し、解析を行った。

2. 2 解析対象の橋梁構造物

本研究における解析対象の橋梁構造物は、伊藤ら²⁾の研究データに基づいて、橋長150mの橋梁7種類に関してDEAによる解析を試みることとした。表-2に橋梁形式、エネルギー消費量等のデータを示す。

ここで表-2の少数主桁橋に関して言及すると、文献4によれば、少数主桁橋は従来型の1桁橋に比して上部構造の環境負荷が95%程度に低減されることが知られているため、これを用いてCO₂排出量等を求めることとした。ま

表-2 解析対象の橋梁

橋種 (150m)	No	径間割	径間割 (m)	工費 (億円)	エネルギー (×10 ⁹ kcal)		CO ₂ (t)		出来高
					総量	単位当り	総量	単位当り	
PC 単純 プレテン T 桁	1	等径間	8@18.8	1.66	3.03	1.825	322.9	194.518	0.6024
	2	最大径間	6@21.0+2@12.0	1.69	3.02	1.787	322.1	190.592	0.5917
PC 単純 箱桁	3	等径間	3@50.0	2.79	3.00	1.075	289.6	103.799	0.3584
	4	最大径間	55.0+2@47.5	2.81	3.00	1.068	289.4	102.989	0.3559
鋼単純 非合成箱桁	5	等径間	3@50.0	3.42	5.79	1.693	539.2	157.661	0.2924
	6	最大径間	60.0+2@45.0	3.49	5.60	1.605	522.3	149.656	0.2865
少数主桁	7	等径間	3@50.0	3.08	4.90	1.591	457.0	148.377	0.3247

た、I 桁と箱桁の換算には、デザインデータブック⁷⁾に示されている、平均支間長 50m の際の鋼重比を用いている。このようにして得られた上部構造の環境負荷値に、下部構造のそれを加えることにより、橋梁システム全体のエネルギー消費量および CO₂ 排出量を得た。さらに、工費については、従来型 I 桁よりも 5～10%低減する⁴⁾との検討結果から、解析対象の従来型鋼橋が箱桁であることも考慮して、工費は No.5 の橋梁に対して 10%低減すると仮定して計算を行った。

次に、リサイクルを考慮した場合の環境負荷パラメータの計算は、エネルギー消費量については鋼橋の場合 60%、コンクリート橋において再生骨材を使用した場合 14%の減少が見込まれるため²⁾、リサイクル材使用の際は、これをそのまま当てはめることとした。CO₂ 排出量に関しては、鋼場合は高炉製鋼(0.411kgC/kg)と電炉製鋼(0.128kgC/kg)の原単価から、30%の削減がなされることが示されている⁸⁾。再生骨材を用いたコンクリートの CO₂ 排出量は、原単価表等に記載が無いため判然としないが、砂利・採石あるいは碎石の原単価が比較的小さいため、再生のためのコンクリート塊の輸送等を考慮すると、CO₂ の削減はあまり期待できないものと思われる。しかしながら、上述のようにエネルギー消費量が 14%低下することを考慮すると、若干の減少はあるものと考え、鋼に準じてエネルギーの減少量の 1/2、すなわち 7%の低減を加味して計算を行うこととした。リサイクル材を用いた場合の工費は、一般にリサイクルそのものにかかる費用が製品にも反映されるため、原材料から生産した場合と比較して同等か若干高価になるものと思われる。よって、本研究においてはリサイクルを考慮した場合においても、バージン材を用いた際と同一の工費で解析を実施した。

さらに、この種の解析では橋梁システムのライフサイクル全体にわたるメンテナンスの費用等も考慮する必要があると考えられるが、本研究はこのような問題に対する DEA の適用性を把握することを主な目的としているため、橋梁の供用中は十分なメンテナンスが行われることを前提として、構造物としての供用可能期間のみをデータとして用いることとする。この供用可能期間については、橋梁の立地条件、施工技術等の差異によって一概に決定することは非常に困難ではあるが、コンクリート橋 50 年、従来型鋼橋 60 年²⁾、合理化橋 100 年²⁾と仮定して取り扱うこととした。表-3 に、本研究における解析 Case を示す。

3. 解析結果とその考察

以上のようにして、本研究では DEA を用いて橋梁の環境負荷に関する定量的評価を試みた。基本的な入出力関係を予備解析にて検討した結果、エネルギー消費量等のパラ

表-3 解析ケース

Case No.	解析条件
Case 1	バージン材を使用 (建設時)
Case 2	Case1+リサイクル率を考慮
Case 3	Case2+寿命を考慮

表-4 各ケースにおける D 効率

橋梁 No.	D 効率		
	Case 1	Case 2	Case 3
1	0.9897	0.9897	0.9897
2	0.9938	0.9938	0.9938
3	0.9993	0.9993	0.9993
4	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.5366	0.9410	0.9410
6	0.5539	0.9938	0.9938
7	0.6332	1.0000	1.0000

メータを工費 1 億円当りに換算して入力とし、出力は橋梁の単位あたり出来高(1 橋/工費)を用いることとした。解析結果の一例として、表-4 に各 Case における D 効率の一覧を、表-5 に Case 3 の解析結果を示す。

まず、表-4 の Case1 に関しては、径間割に工夫を加えた PC 単純箱桁橋が D 効率 1.0 のスラックレス活動となっており、比較を行った橋梁の中では最も環境負荷の小さいものとなっている。PC 単純プレテン T 桁橋と等径間の PC 単純箱桁橋に関しては、D 効率 1.0 ではないものの、十分高い効率値を示しているものと思われる。また鋼橋に関しては、PC 橋に比べ D 効率が大きく劣る結果となった。次に、Case 2 に着目すると、PC 橋においては D 効率に変化は見られないが、リサイクルによるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の低減が極めて大きい鋼橋において、D 効率が大幅に改善されていることがわかる。その中でも、合理化設計された少数主桁橋梁である鋼連続非合成 I 桁の D 効率が 1.0 となっており、最も環境負荷の少ない橋梁システムとなっている。また、Case 3 においては、D 効率が全て Case 2 と同様になっており、単純に寿命のみの比較を行っても、それ自身が環境に及ぼす影響は少ないものと思われる。

ここで、以上の結果について考察を加えると、DEA では効率性の比較が容易に可能であることから、環境負荷への影響度が非常に理解し易い形で表現されていることがわかる。よって、このような問題に対する DEA の適用性、有効性はきわめて高いと考えることができる。例えば、表-2 の PC 単純プレテン T 桁橋と PC 単純箱桁橋のエネルギー消費量等のデータそのものを比較する限りでは優劣が付け難い環境負荷への影響度が、DEA を用いることによって PC 単純プレテン T 桁橋は PC 単純箱桁橋に対して D

効率が若干劣り、これを 1.0 にするためにはどのパラメータをどれだけ改善すれば良いかが具体的な数値で示されている。また、単に数値の比較を行うだけでは、環境に対して非常に不利と思われる鋼橋においても、材料としての特徴であるリサイクル性を考慮することによって、コンクリート橋と遜色ない程度まで環境負荷が改善される可能性を有することが十分に理解できる。さらに、具体的な改善案として、表-5 の PC 単純プレテン T 桁橋では、リサイクル率を現状よりも 60%程度、寿命を約 85 年程度以上に改善すれば環境負荷を大きく低減できるといった数値目標が算出されるため、温室効果ガス排出削減の実現に向けての有効な指標になり得るものと期待される。

したがって、本研究の解析手法は現状の橋梁構造物が有する環境負荷に対する効率性、あるいは具体的な改善案等が非常に理解しやすい形で得られることから、今後の環境に「やさしい」橋梁システムの構築・検討に十分活用できるものと考えられる。

4. あとがき

以上のように、本研究は鋼およびコンクリートを材料とした橋梁システムについて、CO₂ 排出量等のデータをパラメータとして DEA による効率性ならびに改善案の解析を行い、各パラメータの影響を定量的に求めることにより、この種の問題に対する DEA の適用性、環境負荷低減を目指した橋梁構造物のあり方等に関する基礎的な検討を試みた。

解析結果からは、DEA では効率性の比較が容易に可能であることから、環境負荷への影響度が非常に理解し易い形で表現できることが判明した。よって、このような問題に対する DEA の適用性、有効性はきわめて高いものと判断される。具体的には、各橋梁システムのエネルギー消費量等のデータそのものを比較する限りにおいては、優劣が付け難い環境負荷への影響度が、DEA を用いることによって効率性の優劣や、これを向上させるためにはどのパラメータをどれだけ改善すれば良いかが数値で示すことが可能である。また、例えば環境に対して非常に不利と思われる鋼橋においても、材料としての特徴であるリサイクル性等をパラメータとして考慮することにより、環境負荷が改善される可能性を有することが理解できる結果が得られた。さらに、前述の通り具体的な改善案が明確な数値目標で算出されるため、温室効果ガス排出削減の実現に向けての有効な指標になり得るものと期待できる。

したがって、本研究の手法を用いて、LCC 等も含めた形で各種パラメータを設定し、橋梁のライフサイクル全体を考慮した解析を行うことにより、環境負荷を低減させる新たな橋梁システムの検討あるいは提案に活用できる可能性を有するものと考えられる。

【参考文献】

1) 米沢栄二, 三輪恭久, 中原勝也, 中村俊一: CO₂ 発生量に着目した鋼橋の環境負荷, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1075-1082, 2001.
2) 伊藤義人, 平野徹, 永田裕規, ハムルト アシ, 西土隆幸, 加島章: 環境負荷を考慮した橋梁形式選定システムの作成と利用に関する研究, 土木学会論文集, No.553/VI-33, pp.187-199, 1996.
3) 伊藤義人, 永田裕規, スワル・ラックスマン, 西川和廣: 地球環

表-5 Case 3 における改善案

橋梁 No	データ	入力	出力
		効率値	効率値
1	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.811	1.830
	CO ₂ (t)	174.345	176.159
	出来高	0.602	0.609
	エネルギー低減率(%)	23.697	23.943
	CO ₂ 低減率(%)	11.848	11.972
	寿命(年)	84.631	85.511
2	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.779	1.790
	CO ₂ (t)	171.240	172.308
	出来高	0.592	0.595
	エネルギー低減率(%)	23.276	23.421
	CO ₂ 低減率(%)	11.638	11.710
	寿命(年)	83.127	83.646
3	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.078	1.078
	CO ₂ (t)	103.727	103.800
	出来高	0.358	0.359
	エネルギー低減率(%)	14.098	14.108
	CO ₂ 低減率(%)	7.049	7.054
	寿命(年)	50.351	50.386
4	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.070	1.070
	CO ₂ (t)	103.000	103.000
	出来高	0.356	0.356
	エネルギー低減率(%)	14.000	14.000
	CO ₂ 低減率(%)	7.000	7.000
	寿命(年)	50.000	50.000
5	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.590	1.690
	CO ₂ (t)	148.396	157.700
	出来高	0.325	0.345
	エネルギー低減率(%)	60.000	63.762
	CO ₂ 低減率(%)	30.000	31.881
	寿命(年)	100.000	106.270
6	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.590	1.600
	CO ₂ (t)	148.407	149.333
	出来高	0.325	0.327
	エネルギー低減率(%)	60.000	60.374
	CO ₂ 低減率(%)	30.000	30.187
	寿命(年)	100.000	100.624
7	エネルギー(10 ⁹ kcal)	1.590	1.590
	CO ₂ (t)	148.400	148.400
	出来高	0.325	0.325
	エネルギー低減率(%)	60.000	60.000
	CO ₂ 低減率(%)	30.000	30.000
	寿命(年)	100.000	100.000

境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1305, 1999.

4) 伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣: 少数主桁橋梁と在来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1305, 1999.
5) 刀根薫: 経営効率性の測定と改善 —抱絡分析法 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) 日本橋梁建設協会編: デザインデータブック'93 年版, 日本橋梁建設協会, 1993.
8) 酒井寛二: 土木建設物の二酸化炭素排出量原単価の推定, 第 4 回地球環境シンポジウム講演集, pp.43-48, 1996.