

1. ま え が き

産業革命以来、地球が数十億年に亘って石炭・石油として備蓄した炭素を、人類はその生産活動などのために僅か数百年で急激に排出しつつあり、これが地球温暖化の原因の1つとなっていると言われている。1997年、COP3で2012年までにCO₂排出量を1990年に比して6%減少させる決議もなされたが、排出量は依然として増加し続け、今日に至っている。我が国では、1993年に環境基本法が制定されて以来、温暖化の防止、生物多様性の保全、循環型社会の構築などをコアにして、少なくとも500年程度以上の持続的発展が可能な社会の枠組み造りが図られている。よって、社会資本整備においても持続的発展を意識した開発や現有の社会基盤施設の維持管理など、資本投資の効率化や温暖化ガス排出量の削減あるいはリサイクル・リミックスを考慮した社会システムの再構築が必要と考えられる。ここで橋梁構造物に目を向けると、これは上部構造と下部構造から構成された鋼・RCなどの材料を複合的に使用した製品と考えることができる。これを資源という観点から見ると、鉄鉱石や石灰岩などから鋼やコンクリートが生産され、構造物として資源がストックされた状態と考えることが可能である。

本研究では、橋梁構造物における資源ストックとしての鋼重に着目して、鋼橋10種類、PC橋1種類を試設計し、それぞれのCO₂排出量、コスト、製品としての橋、寿命および鋼重をパラメータとして、超包絡分析法(Super Data Envelopment Analysis, SDEA)を適用して環境性能に関する順位付けを行い、その評価を試みるものである。

2. 解 析 手 法

本研究では橋梁システムの環境負荷の効率性解析に包絡分析法(DEA)をベースとした超包絡分析法(SDEA)を用いることとした。まず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。通常、解析手法は2段階線形計画問題(LP)に帰着するが、その性質上2つの大きな問題を抱えている。DEAは性能の良いデータを基準として他のデータを相対的に評価する手法であるため、基準となるデータに極めて優れたものが含まれていると全てのデータが影響を受け、正確な判断が難しくなる。また、図-1のようにDEAはそれぞれのパラメータを総合的に評価して性能の良いデータをいくつか選出し、それをフロンティアラインとして基準を定める。他のデータは、それぞれが最も有利になるように基準となるデータを選択する。したがって、基準として選択され得る性能の良いデータが複数存在する場合、データによって依存する基準が異なるため正確な判断が行えないことになる。これらの問題を解決するために、現在のDEAを改良した新たな評価方法としてSDEAを適用することが考えられる。SDEAは、図-1のフロンティアラインにおいて、D効率を1となる活動を逐次消去して再計算を行い、その結果から再度順位付けを行う手法である。しかしながら1入力1出力程度なら図形的処理も可能であり、比較的容易に真の順位付けが行えるが、多入力多出力の場合、順位の評価は非常に困難である。そこで本研究では、多変数入出力の場合におけるSDEAの評価方法として、あるフロンティアライン上の活動を削除した場合の結果と、すべての点を解析対象とした基準となるD効率の増加量の総和を求め、増加量が最大となったフロンティアライン上の活動が他の活動への影響が最も大きいという観点から、これを最も優れた活動と定義することとした。本研究では、橋梁構造物のライフサイクルを考慮して、交通ネットワークのライフスパンを200年間、橋梁の寿命は75年間と仮定し、適切なメンテナンスを行うという条件下で経済的割引率4%を考慮して140年間経過後のCO₂排出量、ライフサイクルコスト(LCC)、製品としての橋(1橋)、寿命(75年)および資源ストック量としての鋼重(t)をパラメータとしてSDEAを用いた解析を行った¹⁾²⁾。ここで、SDEAにおける入出力関係は、CO₂排出量とLCCが入力、橋(1橋)、寿命と鋼重が出力値として設定した。表-1に橋梁形式とCO₂排出量、LCC、鋼重の各パラメータを示す。

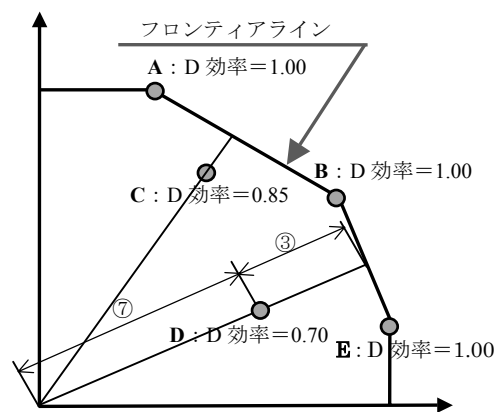


図-1 D効率の求め方 (2変数時)

表-1 各橋梁形式における各材料の重量

No	橋梁形式	鋼重 (t)	CO ₂ (tC)	LCC (千円)
1	2 径間 4 主桁	251.54	491.94	9.32
2	3 径間 4 主桁	215.13	474.67	8.23
3	2 径間 5 主桁	274.12	515.20	10.24
4	3 径間 5 主桁	227.41	486.47	8.72
5	2 径間 2 箱桁	286.92	531.80	11.25
6	3 径間 2 箱桁	220.24	478.76	9.14
7	2 径間 1 箱桁	327.38	578.88	12.16
8	3 径間 1 箱桁	293.03	564.05	11.14
9	2 径間 2 主桁	292.15	500.79	10.61
10	3 径間 2 主桁	162.94	378.81	6.55
11	3 径間 PC	68.71	303.14	5.71

表-2 SDEA の解析例

橋梁 No.	初期解析 の D 効率	No.1 を削除		No.9 を削除		No.10 を削除		No.11 を削除	
		D 効率	増加量	D 効率	増加量	D 効率	増加量	D 効率	増加量
1	1.0	×	0	1.0	0	1.0	0	1.0	0
2	0.99716	0.99517	-0.00199	0.994128	-0.00303	1.0	0.00284	0.994128	-0.00303
3	0.98020	0.98082	0.0006206	1.0	0.019799	0.980202	8.2E-07	0.980202	8.2E-07
4	0.98127	0.98245	0.00118	0.98125	-1.7E-05	0.985672	0.0044018	0.981253	-1.7E-05
5	0.93241	0.93241	0	0.99566	0.063553	0.933013	0.0006029	0.932404	-5.6E-06
6	0.91346	0.91366	0.000235	0.93685	0.023423	0.953731	0.0403059	0.91339	-3.5E-05
7	0.97751	0.97775	0	1.0	0.022249	0.977751	-4.6E-07	0.977751	-4.6E-07
8	0.95529	0.95529	0	0.97562	0.020327	0.955293	-4.6E-07	0.955293	-4.6E-07
9	1.0	1.0	0	×	0	1.0	0	1.0	0
10	1.0	1.0	0	1.0	0	×	0	1.0	0
11	1.0	1.0	0	1.0	0	1.0	0	×	0
		Σ	4.56E-05	Σ	0.146304	Σ	0.0481505	Σ	-0.00309

3. 解析結果とその考察

表-2 に、本研究における SDEA の解析結果の一例を示す。まず、初期解析において橋梁の建設に使用された鋼を社会的な資源ストックとして考えた場合、4 種類の橋梁で D 効率が 1.0 となり鋼橋、PC 橋ともに適切に設計されたケースではほとんど差が生じないことが判明した。箱桁を用いた橋梁は、0.913～0.977 程度と効率性が他の橋梁形式と比較してやや劣る結果となったが、2 径間ないし 3 径間の橋長 90m 程度では、鋼箱桁の選択は特殊な設計と言っても過言ではなく、そのため効率性が若干悪化したものと考えられる。

次に、SDEA の結果に着目すると、表-2 の場合増加量の合計が、No.9 の 2 径間 2 主桁橋を除外した場合が最も大きくなっており、No.9 の橋梁形式が最も効率的であるという結果が得られた。表-1 のデータを比較すると、鋼重、CO₂ 排出量、LCC の面から考えてもバランスが取れており、この形式が最も環境性能が高いものと判断できる。したがって、本研究で用いた多入出力の SDEA における評価方法は、D 効率が複数 1.0 となった場合の正しい順位付けに適用可能であると思われる。

また、表-3 は DEA による順位付けと SDEA による順位付けの比較である。DEA の場合、1 位の橋梁が 4 種類も存在しどれが最も効率的か判然としないが、下位となる橋梁についてはほぼ正しいと思われる結果が得られている。一方、SDEA については、上位 6 位までは完全に順位付けがなされたものの、下位については No.1 と No.5 が同率 7 位、No.4, 6, 8 が同率 8 位となってしまう、最後まで十分な順位付けが出来ない結果となった。この原因は、上位から順位が決まり、比較する事象の数そのものが減少してしまい、最終的には下位の橋梁においてすべて D 効率が 1.0 になることにより、比較が不能になったことが挙げられる。また、特筆すべきは初期段階で D 効率が 1 位であった No.1 の橋梁が SDEA では 7 位にランクされたことである。表-2 のデータからは、資源ストックとしての鋼重は比較的大きいが、CO₂ 排出量、LCC もそれなりに大きく、データからは非常に中途半端な印象を受ける。このため、SDEA のような厳密な順位付けを行うと、わずかな差が順位付けに大きく影響し、結果として下位にランクされたものと推測される。したがって、比較する対象により DEA と SDEA を使い分け、すべてにおいて正しい順位付けを行うことが必要であると考えられる。

表-3 DEA と SDEA の比較（順位）

No	橋梁形式	DEA	SDEA
1	2 径間 4 主桁	1 位	7 位
2	3 径間 4 主桁	2 位	4 位
3	2 径間 5 主桁	4 位	6 位
4	3 径間 5 主桁	3 位	8 位
5	2 径間 2 箱桁	7 位	7 位
6	3 径間 2 箱桁	8 位	8 位
7	2 径間 1 箱桁	5 位	5 位
8	3 径間 1 箱桁	6 位	8 位
9	2 径間 2 主桁	1 位	1 位
10	3 径間 2 主桁	1 位	2 位
11	3 径間 PC	1 位	3 位

4. あ と が き

以上のように、本研究は橋梁を架設する際に、社会における鋼の資源ストックという概念を導入し、多変数入出力の事象における順位付けの手法として SDEA を導入して、各種橋梁構造物の環境性能評価を試みたものである。

解析結果からは、本研究で用いた SDEA の順位設定方法は妥当であり、上位となる事象の正確な順位付けがなされることが確認された。また、資源ストックの概念を導入すると、鋼橋、PC 橋ともに、合理的な設計が行われている場合、環境性能についてほとんど差異がないことが判明した。さらに、少主桁形式の橋梁は SDEA において 1, 2 位となり、環境性能において非常に優れた形式であることが確認された。

【参考文献】

- 1) 小幡卓司, 大野良輔: 橋梁構造物のライフサイクルにおける地球温暖化環境負荷の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol62, No.2, 2006, 4.
- 2) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針, 2004.