

大阪府立大学工業高等専門学校 総合工学システム専攻土木工学コース 学生員○小田 輝  
 大阪府立大学工業高等専門学校 総合工学システム専攻土木工学コース 正会員 小幡 卓司

1. まえがき

地球が数十億年の歳月を費やして石炭・石油として備蓄した炭素を、産業革命以降、人類は生産活動のために等比数的に大量排出し続け、これが地球温暖化の原因の1つとなっているとも言われている。1997年、COP3で2012年までにCO<sub>2</sub>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ている。2011年のCOP17では、京都議定書の延長措置が行われた上で、新たな排出量削減の模索が議題となった。我が国では、1993年の環境基本法の制定から、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中心とした少なくとも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。

一方、社会資本整備においては、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、また、いわゆる3Rを考慮した社会システムの構築が必要と考えられる。交通ネットワークが発達した今日では、その一部である橋梁構造物の役割は非常に重要となり、社会の持続可能性を維持するためには、将来に負の遺産を残さない社会基盤施設の整備が必要である。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CO<sub>2</sub>排出量、コスト、製品としての橋、寿命と鋼重をパラメータとして、抱絡分析法（以下、DEAと称す）を適用して環境性能に関する改善案の検討を行い、その評価を試みるものである。

2. DEAによる解析とその考察

DEAは同種の入出力関係を有する複数の事業体、活動、製品などに対して、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。本研究では、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、割引率4%を考慮して140年間経過後のCO<sub>2</sub>排出量、ライフサイクルコスト(LCC)、製品としての橋(1橋、橋長は全て90m)、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DEAで解析を行った<sup>1)2)</sup>。DEAの入出力関係は、CO<sub>2</sub>排出量とLCCが入力、橋(1橋)、寿命と鋼重を出力値に設定した。表-1に橋梁形式とCO<sub>2</sub>排出量、LCC、鋼重の各パラメータを示す。なお、PC橋は、75年間メンテナンスフリーとして、舗装の維持管理コストのみ計上している。

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 <sub>2</sub> (tC)	LCC (千万円)
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は、本研究における140年間経過後の解析結果である。D効率は、鋼橋3橋とPC橋が1.0となり、全ての橋梁で0.9以上となる結果となった。鋼重を考慮しない場合は、PC橋に比してD効率は0.6~0.8程度であることから、鋼のリサイクル性を考慮すると、PC橋、鋼橋とも大差なく、必要な橋長に対して適切な橋梁形式、径間割を選択して設計すれば、環境性能もある程度確保できる結果が得られた。

ここで、D効率と改善案に着目すれば、まずNo.1とNo.2においてNo.2の方が非効率でCO<sub>2</sub>排出量が多すぎるという結果になっている。これは、橋脚1基分のCO<sub>2</sub>が影響し、わずかながらD効率が低下したと思われる。また、高度成長期に多数架設されたであろうNo.4については、入力改善値からはCO<sub>2</sub>が若干多く、LCCもわずかに高いが、出力の改善を見ると、140年間の解析期間の中で、製品が0.018の不足、すなわちコストダウンの必要と供用期間の2年程度の延長、維持管理における1.7t程度のCO<sub>2</sub>排出量の低減で対処可能な結果となっている。これは、現在供用されている鋼橋において、何らかの重防食と適切な補修・補強などを行い、供用期間を80年以上とすれば、環境性能も少数主桁橋やコンクリート系橋梁に遜色ない性能を発揮出来るものと推定される。鋼箱桁橋については、橋長を考慮すると元来適切な選択ではないため、No.5~No.8の橋梁において、いずれのデータにおいてもかなり改善の必要がある。特に、箱桁橋では寿命の10年程度の延長が求められており、これに伴いLCCも上昇する可能性は大きいと思われる。ただし、No.7の2径間1箱桁橋ではD効率0.9772であり、箱桁に適した径間長の場合は高い効率性を示す可能性もあるものと考えられる。さらに、優位集合に関しては、D効率が1以下の橋梁は、形式や径間割に近い橋梁を選択する傾向があることが分かった。少数主桁橋については、2径間、3径間ともにD効率が1となっており、今回の解析結果では有意な差は見られないが、逆に支間長が与えられた際に、D効率の値を比較検討することで、最適な径間割の検討ができ得るものと思われる。また、PC橋において、今回はメンテナンスフリーとしてCO<sub>2</sub>、LCCの計算を行っているが、実際はひび割れなどの補修も行われているため、CO<sub>2</sub>排出量およびLCCは増加する可能性が高いと思われる。

ここで、D効率と改善案に着目すれば、まずNo.1とNo.2においてNo.2の方が非効率でCO<sub>2</sub>排出量が多すぎるという結果になっている。これは、橋脚1基分のCO<sub>2</sub>が影響し、わずかながらD効率が低下したと思われる。また、高度成長期に多数架設されたであろうNo.4については、入力改善値からはCO<sub>2</sub>が若干多く、LCCもわずかに高いが、出力の改善を見ると、140年間の解析期間の中で、製品が0.018の不足、すなわちコストダウンの必要と供用期間の2年程度の延長、維持管理における1.7t程度のCO<sub>2</sub>排出量の低減で対処可能な結果となっている。これは、現在供用されている鋼橋において、何らかの重防食と適切な補修・補強などを行い、供用期間を80年以上とすれば、環境性能も少数主桁橋やコンクリート系橋梁に遜色ない性能を発揮出来るものと推定される。鋼箱桁橋については、橋長を考慮すると元来適切な選択ではないため、No.5~No.8の橋梁において、いずれのデータにおいてもかなり改善の必要がある。特に、箱桁橋では寿命の10年程度の延長が求められており、これに伴いLCCも上昇する可能性は大きいと思われる。ただし、No.7の2径間1箱桁橋ではD効率0.9772であり、箱桁に適した径間長の場合は高い効率性を示す可能性もあるものと考えられる。さらに、優位集合に関しては、D効率が1以下の橋梁は、形式や径間割に近い橋梁を選択する傾向があることが分かった。少数主桁橋については、2径間、3径間ともにD効率が1となっており、今回の解析結果では有意な差は見られないが、逆に支間長が与えられた際に、D効率の値を比較検討することで、最適な径間割の検討ができ得るものと思われる。また、PC橋において、今回はメンテナンスフリーとしてCO<sub>2</sub>、LCCの計算を行っているが、実際はひび割れなどの補修も行われているため、CO<sub>2</sub>排出量およびLCCは増加する可能性が高いと思われる。

表-2 解析結果の一覧 (140 年間, 架け替え 1 回)

橋梁 No.	D 効率	優位集合	スラック解		入力データ		入力を改善		出力を改善	
					単位	値	効率値	差	効率値	差
1	1.0000	1 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	491.937	491.937	0.000	491.937	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	9.316	9.316	0.000	9.316	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	251.540	251.540	0.000	251.540	0.000
2	0.9937	1 (0.589) 10 (0.411)	余剰	26.2361	CO <sub>2</sub> (tC)	474.668	445.446	-29.222	448.266	-26.402
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	8.233	8.233	0.000	8.233	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.475	0.475
			不足	0.0000	鋼重 (t)	215.130	215.130	0.000	215.130	0.000
3	0.9799	1 (0.444) 9 (0.556)	余剰	7.9593	CO <sub>2</sub> (tC)	515.199	496.859	-18.340	507.076	-8.123
			余剰	0.3143	LCC (千万円)	10.240	9.720	-0.521	9.920	-0.321
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.021	0.021
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	76.542	1.542
			不足	0.0000	鋼重 (t)	274.120	274.120	0.000	279.757	5.637
4	0.9823	1 (0.728) 10 (0.272)	余剰	1.6714	CO <sub>2</sub> (tC)	486.468	476.171	-10.297	484.766	-1.702
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	8.719	8.564	-0.155	8.719	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.018	0.018
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	76.354	1.354
			不足	0.0000	鋼重 (t)	227.410	227.410	0.000	231.515	4.105
5	0.9324	9 (0.960) 10 (0.040)	余剰	0.4102	CO <sub>2</sub> (tC)	531.800	495.442	-36.358	531.360	-0.440
			余剰	0.0441	LCC (千万円)	11.248	10.443	-0.804	11.200	-0.047
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.072	0.072
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	80.437	5.437
			不足	0.0000	鋼重 (t)	286.920	286.920	0.000	307.721	20.801
6	0.9137	1 (0.154) 9 (0.338) 10 (0.508)	余剰	0.2158	CO <sub>2</sub> (tC)	478.763	437.240	-41.523	478.527	-0.236
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	9.138	8.349	-0.788	9.138	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.094	0.094
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	82.082	7.082
			不足	0.0000	鋼重 (t)	220.240	220.240	0.000	241.036	20.792
7	0.9772	9 (1.000)	余剰	4.5088	CO <sub>2</sub> (tC)	578.880	561.178	-17.702	574.266	-4.614
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	12.163	11.886	-0.277	12.163	0.000
			不足	0.1206	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.121	1.147	0.147
			不足	9.0442	寿命 (年)	75.000	75.000	9.044	86.004	11.004
			不足	0.0000	鋼重 (t)	327.380	327.380	0.000	335.015	7.635
8	0.9554	9 (1.000)	余剰	3.6569	CO <sub>2</sub> (tC)	564.047	535.209	-28.838	560.219	-3.828
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	11.136	10.639	-0.407	11.136	0.000
			不足	0.0003	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.047	0.047
			不足	0.2259	寿命 (年)	75.000	75.226	0.226	78.741	3.741
			不足	0.0000	鋼重 (t)	293.030	263.030	0.000	306.723	13.693
9	1.0000	9 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	500.789	500.789	0.000	500.789	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	10.607	10.607	0.000	10.607	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	292.150	262.150	0.000	292.150	0.000
10	1.0000	10 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	378.814	378.814	0.000	378.814	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	6.555	6.555	0.000	6.555	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	162.940	162.940	0.000	162.940	0.000
11	1.0000	11 (1.000)	余剰	0.0000	CO <sub>2</sub> (tC)	303.138	303.138	0.000	303.138	0.000
			余剰	0.0000	LCC (千万円)	5.711	5.711	0.000	5.711	0.000
			不足	0.0000	製品 (1 橋)	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
			不足	0.0000	寿命 (年)	75.000	75.000	0.000	75.000	0.000
			不足	0.0000	鋼重 (t)	68.710	68.710	0.000	68.710	0.000

### 3. あとがき

以上のように、本研究は DEA を用いて、各種橋梁形式の D 効率を算出し、環境性能向上の可能性について検討を加えたものである。解析結果からは、鋼を資源ストックとしてそのリサイクル性を評価すれば、PC 橋とほぼ同一の環境性能が得られることが判明した。また、架橋地点に対して、適切な径間割、形式の選択が行われていれば、十分な環境性能が得られる結果となることが明らかとなった。また、本研究の方法は、具体的な改善案が提示可能なため、例えば、現在供用中の橋梁において、今後の維持管理計画を策定する一助にでき得る可能性も有するものと思われる。

#### 【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) 中西宏貴, 小幡卓司: 橋梁構造物の地球温暖化環境負荷における定量的評価手法に関する研究, 土木学会関西支部平成 23 年度発表会講演概要集, I-11, 平成 23 年 6 月