

鋼橋の防錆手法によるコストおよび環境負荷の関係について

Study on Relation of Cost and Environmental Impact by Corrosion Prevention Technology of Steel Bridges

北海道大学大学院工学研究科 正員 小幡卓司 (Takashi Obata)
 北海道大学大学院工学研究科○学生員 大野良輔 (Ryousuke Ohno)
 北海道大学大学院工学研究科 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)

1. まえがき

近年、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、早期に解決すべき非常に重要な項目であることは周知の事実である¹⁾。社会基盤施設整備に当たっても構造物の環境性能を考慮することは極めて重要であると考えられる。従来の基盤整備では、建設時のコストを最小にすることが専ら問題とされていたが、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。

以上を踏まえて、橋梁の供用期間における環境負荷を考慮するため、本研究では、鋼橋の塗装、塗装塗替えに着目した。具体的には、初期投資と塗装に関するライフサイクルコスト(LCC)を算出し、そのLCCと環境負荷をパラメータとしてDEA解析に適用することで、環境への影響等を検討することを目的とする。よって、本研究ではこれらの解析を通じて、鋼橋の防錆手法によるコストと環境負荷の関係について検討を行ったので、ここに報告するものである。

2. 解析手法と対象構造物

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(Data Envelopment Analysis, 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^{2,3)}。

DEAでは、一般に解析手法は2段階線形計画問題(LP)に帰着し、最も基本的なモデルであるCCRモデルにおいては、以下のようなLPを解くことによって所定の解を得ることができる。

$$\begin{aligned} \text{第1目的関数} & \min \theta \\ \text{第2目的関数} & \min -es_x - es_y \\ & \theta x_0 = X\lambda + s_x \\ \text{制約条件} & y_0 = Y\lambda - s_y \\ & \theta \geq 0 \quad \lambda \geq 0 \quad s_x \geq 0 \quad s_y \geq 0 \end{aligned}$$

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、出力の不足を表す変数である。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び、 $s_x=0, s_y=0$ を満たす活動をスラックレス活動と呼ぶ。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。

次に、本研究における解析対象の橋梁構造物は、一般

国道に架設される中規模の橋梁を想定して、橋長90m、幅員11.8mの4主桁3径間連続非合成鋼桁橋とした。建設初期工費は154,557,000円、塗装面積は3669.97m²である⁴⁾。

3. 防錆手法

3.1 一般塗装系

本研究では、一般的な塗装系として、3種類の塗装系を設定した。表-1に、その種類、期待年数、初期塗装単価および塗替え塗装単価を示す。初期塗装費用と塗替え塗装費用は初期塗装単価および塗替え単価に塗装面積を乗じることでそれぞれ算出した^{5,6)}。

表-1 一般の塗装系

塗装系	上塗り塗装	期待年数(年)	初期塗装単価(円/m ²)	塗替え塗装単価(円/m ²)
a-1 塗装系	長油性フタル酸樹脂塗料	10	6,352	5,090
c-1 塗装系	ポリウレタン樹脂塗料	15	12,063	13,041
c-3 塗装系	ふっ素樹脂塗料	25	19,301	13,441

3.2 耐候性鋼、新耐候性鋼

耐候性鋼とは、Cu、Cr等の合金元素を含有し、無塗装のまま年月の経過と共に表面に緻密で密着性の高い錆を形成する鋼材である。その使用方法として、無塗装使用と塗装使用に大別され、その内の無塗装使用に裸使用と錆安定化処理使用がある。今回は、無塗装使用の錆安定化処理使用を耐候性鋼として採用することとした。耐候性鋼のコストは文献7)を参考に普通鋼塗装使用のコストを1.05倍することにより求めた。

新耐候性鋼とは、飛来塩分量が多く従来の耐候性鋼が使用できなかった海岸地域等でも使用可能な海岸・海洋耐候性鋼である。新耐候性鋼のコストは文献8)を参考に耐候性鋼のコストを1.35倍することにより算出した。

4. 累積コスト比較

各種防錆手法を使用し、架け替えを考慮しない場合における鋼橋の100年間の累積コストを図-1に示す。ここで、一般に鋼橋の寿命が60年と言われているのを考慮して、図-1において経過年数60年の防錆手法の累積コストを抽出し表-2に示す。表-2からは、耐候性鋼の累積コストが一番安価となり、3種の塗装系の中ではフタル酸の累積コストが最も低い結果となることがわかる。

5. 解析結果とその考察

解析対象橋梁の建設時におけるエネルギー消費量は1.77(×10⁹kal)、CO₂排出量は165.37(t)である⁴⁾。本研究では、一般の塗装系による環境負荷(エネルギー消費とCO₂排出)の増加はないとした。耐候性鋼、新耐候性鋼の使用による環境負荷増加もないと仮定すると、差はコス

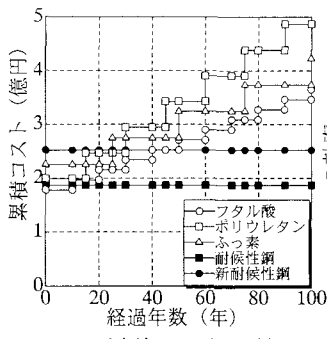


図-1 累積コスト比較図

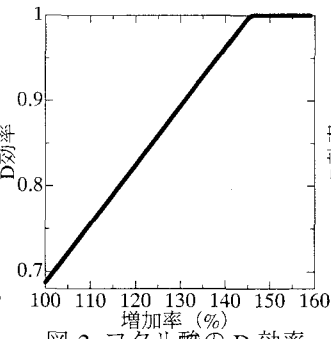


図-2 フタル酸の D 効率 (耐候性鋼との比較)

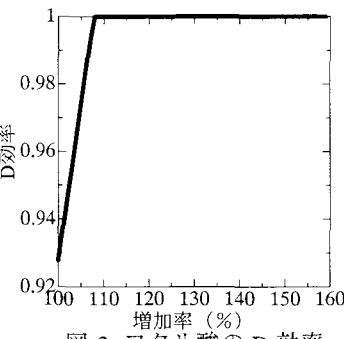


図-3 フタル酸の D 効率 (新耐候性鋼との比較)

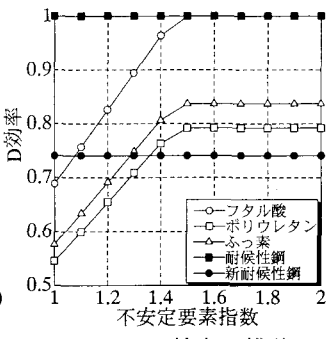


図-4 D 効率の推移

表-2 経過 60 年の累積コスト

No	防錆手法	累積コスト(円)
1	フタル酸	271,270,559
2	ポリウレタン	342,407,810
3	ふっ素	324,048,238
4	耐候性鋼	186,763,315
5	新耐候性鋼	252,130,476

表-3 D 効率一覧

No	防錆手法	D 効率
1	フタル酸	0.6885
2	ポリウレタン	0.5454
3	ふっ素	0.5764
4	耐候性鋼	1.0000
5	新耐候性鋼	0.7408

トのみとなる。この場合の D 効率はコストにのみ依存するが、どの程度差が表れるかを明確にするために DEA 解析を行った。入力エネルギー消費量と CO₂ 排出量、出力を橋梁の 1 千万円当たりの完成度(1 橋/工費)とする。解析により得られた結果を表-3 に示す。表-3 からは、最もコストの低い耐候性鋼の D 効率が 1 となり、コストの高い順に D 効率も小さくなっている。

耐候性鋼と新耐候性鋼の環境負荷の具体的な数値は明らかとなっていないが、ともに、普通鋼材に微量の添加元素を加え合金化したものであることから、普通鋼材よりも製作時の環境負荷は多少大きくなると考えられる。そこで、耐候性鋼、新耐候性鋼のエネルギー消費量、CO₂ 排出量の入力値を 1% ずつ増やしていき、一般塗装系の中で D 効率の最も大きかったフタル酸との比較を行い、フタル酸の D 効率が 1 となるまでの推移から、耐候性鋼、新耐候性鋼の環境負荷を検討することとした。図-2 に、耐候性鋼のエネルギー消費量、CO₂ 排出量の入力値を 1% ずつ増やしていった場合におけるフタル酸の D 効率の推移を示した。図-2 からは、耐候性鋼の環境負荷を約 45% 増加させた場合にフタル酸の D 効率が 1 となるという結果が得られた。この結果からは、耐候性鋼材が普通鋼材よりも環境負荷が 45% 程度大きければ、フタル酸が耐候性鋼と同等の効率性を有するということである。しかしながら、耐候性鋼材が普通鋼材に比べて環境負荷が大きいとしても、普通鋼材に添加元素を加え合金化する過程でそれほど大きな環境負荷が発生するとは考えにくい。よって、一般の塗装系よりも耐候性鋼を用いた方が環境にやさしい防錆手法であると思われる。

同様に、新耐候性鋼のエネルギー消費量、CO₂ 排出量の入力値を 1% ずつ増やしていった場合におけるフタル酸の D 効率の推移を図-3 に示した。図-3 からは、新耐候性鋼の環境負荷を約 7% 増加させた場合にフタル酸の D 効率が 1 となるという結果が得られた。つまり、新耐候性鋼材が普通鋼材よりも環境負荷が 3% ほど大きければ、フタル酸が新耐候性鋼と同程度の効率性を持つということである。新耐候性鋼を製作する過程で、普通鋼材よりも 7% 以上の環境負荷は十分に考えられることから、環境を考慮した場合においては、一般塗装系の中で最も効率的なフタル酸は新耐候性鋼と同等か、それ以上の環境性能を有すると考えられる。

6. 耐候性鋼の不安定要素

これまでの解析からは耐候性鋼の LCC が他の防錆手

法と比べて低く、環境を考慮しても効率的であるという結果になった。しかし、耐候性鋼における安定錆の詳細な構造や生成機構については現在でも十分解明できていない⁹⁾。そこで、耐候性鋼安定錆の形成の不安定要素を不安定要素指数として入力のパラメータに加え、同様の解析を行うこととした。指数としては耐候性鋼の不安定要素は一般塗装系を基準に 10% ずつ増やしていった。DEA による解析結果の D 効率の推移を図-4 に示す。図-4 から、耐候性鋼の不安定要素指数を 50% 増加した場合に、一般塗装系のフタル酸が D 効率 1 となり、耐候性鋼と同様の効率性を示すことが判明した。

7. あとがき

橋梁のライフサイクル全体における環境負荷を考慮するため、鋼橋の防錆手法に着目した本研究の解析においては、耐候性鋼の LCC が他の防錆手法と比べて低く、環境を考慮しても効率的であるという結果になった。しかし、耐候性鋼の安定錆の不安定要素を指数としてパラメータに加えた結果では、50% で一般塗装系と同程度の効率性を示すことが判明した。各塗装系の比較においてはフタル酸が効率的であったことから、期待年数が短い塗装を適切に行うことで耐候性鋼と同程度の効率性を示す十分な可能性を有することが推定できる結果が得られた。

したがって、本研究の手法を用いて、地域環境や 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ものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 安井至：市民のための環境学ガイド時事編：2003 年版 HP, http://plaza13.mbn.or.jp/~yasui_it/
- 2) 刀根薫：経営効率性の測定と改善 一抱絡分析法 DEA による一、日科技連出版社, 1993.
- 3) 今野浩：線形計画法, 日科技連出版社, 1987.
- 4) 小幡卓司, 大野良輔, 高田詞之, 林川俊郎, 佐藤浩一, 小野武彦：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, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 59 号, pp.892-893, 2003.
- 5) 川本恭朗, 山田健太郎：鋼橋の防食技術に関するライフサイクルコスト評価, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.705-710, 2000.
- 6) 村井弘人：塗装塗替からみた道路構造物維持管理低減についての一考察, HP, <http://meihoeng.co.jp/ronbun/>
- 7) (社)日本鉄鋼連盟 橋梁研究会編：高性能鋼の概要
- 8) JFE：NKK News Release:3, March 1999, HP, <http://jfe-holdings.co.jp/release/nkk/9903/0303.html>
- 9) JFE：鉄鋼プロセス工学入門, HP, <http://jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html>