

腐食環境下に架設された鋼橋の防食に関する LCC 評価法

坂本 達朗* 鈴木 実*
 山中 翔* 小林 裕介**

LCC Evaluation Method regarding the Anticorrosion of Steel Bridge in a Highly Corrosive Environment

Tatsuro SAKAMOTO Minoru SUZUKI
 Sho YAMANAKA Yusuke KOBAYASHI

Nowadays, in steel railway bridges that have been used for a long period of time under a highly corrosive environment, corrosion beneath the coating film progresses at an early stage of their use. Thus, it is necessary to select a high-quality surface preparation method. However, the cost of high-quality base adjustment is high. Therefore, it is essential to establish not only a method for selecting the steel bridge that requires high quality re-painting but also a re-painting method in consideration of life-cycle cost (LCC evaluation method). The authors examined a method for selecting the steel bridge to be subjected to the LCC evaluation method, and prepared a LCC evaluation method in consideration of the cost of surface preparation. Based on the trial calculation of the LCC made on model steel bridges with typical structure, an appropriate re-painting method is proposed.

キーワード：維持管理，防食，鋼構造物，ライフサイクルコスト，塗膜下腐食

1. はじめに

腐食性の高い環境において長期間供用された鋼鉄道橋では、塗膜下での腐食（以下、塗膜下腐食と呼ぶ）が早期に生じる現象が散見される（図1）。これは、腐食に伴う減肉によって凹凸を生じた部材では、塗替え前の素地調整においてさびを完全に除去することが困難であり、残ったさびが原因となって塗膜下腐食が促進されるためであると経験的に知られている。このため、早期の腐食が懸念される鋼鉄道橋では、ブラスト工法などの、高コストではあるが現状よりも高度な素地調整手法の導入が必要となる。また、近年では鋼鉄道橋の維持管理の省力化・効率化のニーズが増大しており、塗替え周期を延伸可能な塗替え技術の導入が望まれている。このような背景を考慮すると、塗装費用や塗替え周期などを考慮したライフサイクルコスト（LCC）による維持管理の適正化が必要な状況にある。

そこで本研究では、腐食性の高い環境に架設されている鋼鉄道橋の適切な塗替え施工方法を提案することを目的として、適切な素地状態とする場合の作業性やその諸費用を評価・算出した。これに基づき塗替えに関する実用的な LCC 評価法を作成し、代表的な構造形式のモデル鋼橋に対して LCC を試算することで適切と考えられる塗替え施工方法について検討した。

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

なお、腐食性の低い環境に架設された鋼鉄道橋など、塗膜下腐食の見られない鋼鉄道橋では、高度な素地調整を実施する必要が低いことから、本稿で検討する LCC 評価法の適用除外に分類



図1 塗膜下腐食の例

する必要はある。そこで LCC 評価法の検討に先立ち、LCC 評価法の適用対象とする鋼鉄道橋の選定手法についても検討した。

2. LCC 評価法の適用対象となる鋼鉄道橋選定手法の検討

2.1 塗装腐食鋼板を用いた評価手法

LCC 評価法の適用対象とする鋼鉄道橋の選定にあたっては、さびが残置された状態で塗装した場合の塗膜下腐食の進行程度を評価する必要がある。しかしながら、塗膜下腐食の進行には温度や濡れ時間などの様々な環境因子が影響するほか、塗膜の耐久性についても考慮する必要があり、幾つかの環境因子の測定から塗膜下腐食の進行程度をシミュレーションすることは困難である。

そこで本研究では、さびが残された状態で塗装した小型試験片（以下、塗装腐食鋼板とする）を作製し、鋼鉄道橋の各部材に設置・暴露することで各部材に塗膜下腐

特集：材料技術

食が生じた場合の進行程度を推定する手法を考案した。本手法は、鋼構造物の各部材の腐食性を評価するために提案された、裸鋼板を用いた評価試験方法¹⁾を参考にしたものである。

本手法の妥当性を検証するため、塗装腐食鋼板と裸鋼板を公的暴露試験場にて暴露して塗膜下腐食の進行程度を評価した。また、過去に塗膜下腐食が生じた鋼鉄道橋および非常に腐食性の低い環境に設置される鋼橋切り出し部材に、塗装腐食鋼板と裸鋼板を設置・暴露し、塗膜下腐食と裸鋼板の腐食の進行程度を比較評価した。

2.2 塗装腐食鋼板の概要

2.2.1 腐食鋼板の作製方法

試験鋼板には JIS G 3101 に規定される冷間圧延鋼板 (SS400, 両面サンドブラスト処理) を用いた。鋼板の寸法は 150 × 70 × 3.2mm とし、後述する鋼鉄道橋への設置試験の際には落下の危険性を考慮して 75 × 70 × 3.2mm とした。試験鋼板の腐食条件には、腐食状態の再現性を高めるため、屋外暴露ではなく、室内での促進腐食試験方法である連続中性塩水噴霧条件を採用した。このとき、実構造物であり見られない“さびこぶ”などの腐食形態が生じにくいとされる条件²⁾を参考に、塩水濃度を 0.01wt% または 0.05wt% とし、噴霧時間を 168 時間または 840 時間とした。塩水噴霧終了後には、さびの表面に付着する塩分の除去と、さび/鋼材間での剥離の抑制を目的として蒸留水噴霧を 168 時間実施し、さらに室内で 3 日間養生した。最後に、さびが残置された状態を再現するため、ゆるく付着するさびをワイヤブラシを用いて除去した。このようにしてさびを生じさせた鋼板を腐食鋼板とした。

2.2.2 塗装仕様の概要

塗装仕様には、鋼鉄道橋で多くの使用実績を有する塗装系 B 相当の仕様 (鉛・クロムフリーさび止めペイント 2 回塗 + 長油性フタル酸樹脂塗料中塗および上塗各 1 回塗) または塗装系 T (厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 3 回塗 + 厚膜型ポリウレタン樹脂塗料上塗 1 回塗) を適用した。なお、「塗装系 B 相当」としたのは、塗装系 B で使用されている鉛系さび止め塗料が現在入手困難であり、鉛・クロムフリーさび止め塗料に変更したためである。

2.3 公的暴露試験場での暴露試験

作製した塗装腐食鋼板と裸鋼板を日本ウエザリングテストセンター宮古島暴露試験場に設置した。設置条件は JIS Z 2381 に準じた方法とし、暴露時期は 2015 年 4 月から 11 月とした。

塗装腐食鋼板の暴露経過月数と、目視により算出した塗膜膨れ面積率を図 2 に示す。同図において、塗装系 B 相当を適用した試験片の方が大きな塗膜膨れ面積率を

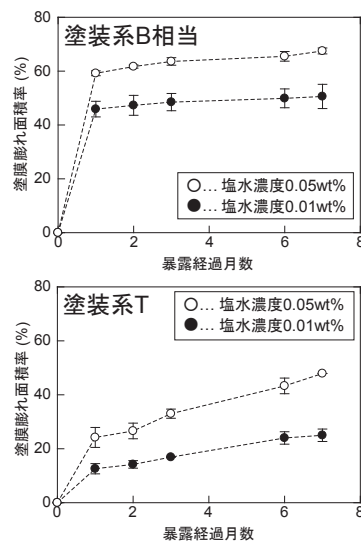


図 2 塗膜膨れ面積率の推移

示した。これは、塗装系 B 相当は塗装系 T と比較して塗膜の耐久性が低いためと考えられる。また、塗装系 B 相当では塗膜の膨れ面積率が一定の面積率に収束する傾向にあること、塗装系 T では暴露初期と比較して塗膜膨れ面積率の増加程度が緩やかになることが確認された。これは、塩水噴霧によって作製した腐食鋼板では、さびの性状の異なる領域が混在しており、その中でもさび中に塩化物イオンを含む領域において塗装後に膨れが進行しやすいためである³⁾。このため、さび中に塩化物イオンを含む領域において優先的に塗膜膨れを生じ、塗膜膨れ面積率が一定の面積率となる傾向にあったと推定される。

次に、暴露月数に対する塗装腐食鋼板の腐食度を評価した。裸鋼板の腐食度は、さび除去前後の鋼板質量の差分から計算した減肉厚みの平均値 (侵食度) により評価した。塗装腐食鋼板の場合、塗膜下のさびを除去するのは困難であるため、腐食の進行によってさびが増加した分の質量増加量を腐食度に見立てて⁴⁾ 評価している。裸鋼板の暴露月数に対する侵食度を図 3 に、塗装系 T を適用した試験片の暴露月数に対する質量変化量を図 4 に示す。なお、塗装系 B 相当を適用した試験片では、暴露中に目視で判断し得るほどの大きな塗膜割れや剥がれが生じ、塗膜下腐食の進行程度のみでの評価が困難であったため、本検討から除外した。

裸鋼板の侵食度は式 (1) で近似され、暴露期間が延びるほど裸鋼板が腐食しにくくなることが知られている⁵⁾。これは、腐食に影響する環境因子に対して腐食生成物層が保護性を示すためと考えられる。本試験においても、最小二乗法による累乗回帰曲線と測定値に近い傾向にあった。ここで、 y は侵食度、 a, b は腐食速度パラメータ、 x は暴露年数である。

$$y = a \times x^b \quad (b \leq 1) \quad (1)$$

その一方で、塗装腐食鋼板の質量は暴露期間とともに増加量が拡大しており、塗膜下腐食の進行は暴露期間が長くなるほど加速する傾向にある。この要因の一つに、塗膜下腐食の進行に伴う微細な塗膜割れ等の塗膜欠陥の発生による塗膜の環境遮断性の低下が挙げられ、暴露期間が長くなるほど塗膜下腐食が進行しやすい状態になったことが推定される。また、塗膜下腐食では、腐食生成物を構成する結晶性酸化鉄の一つである含水水酸化鉄が式(2)に示す還元反応を生じる²⁾。



この反応では水分子の離脱ともない反応後の腐食生成物の体積が収縮して多くの空隙が生じ、脆弱なさび層が形成される。このため、水分や酸素が腐食生成物を通して易くなり、腐食に対する保護性を示さなくなったことが推定される。

以上の結果から、塗膜下腐食の腐食度は裸鋼板の腐食度とは異なるものであり、部材への設置・暴露により鋼橋の塗膜下腐食の進行程度を評価する場合の試験片には、裸鋼板よりも塗装腐食鋼板を用いるのが適切であることが分かった。

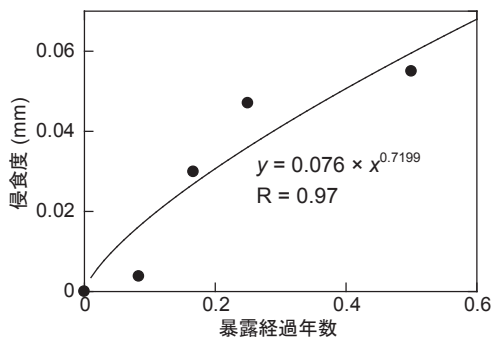


図3 裸鋼板の侵食度

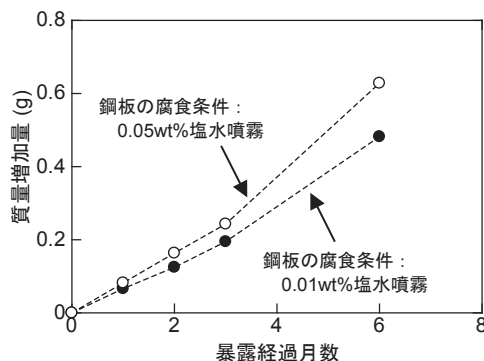


図4 塗装腐食鋼板（塗装系 T）の質量変化

2.4 鋼鉄道橋および鋼橋切り出し部材での暴露試験

各試験片を貼付する鋼鉄道橋は、過去に著しい腐食が局所的に発生しており、腐食性の高い環境、すなわち本課題で示す LCC 評価法の対象鋼橋に分類される鋼鉄道橋 3 橋（A 橋～C 橋と呼ぶ）と、非常に腐食性の低い環境である鉄道総研国立研究所内に架設した廃用桁の切り出し部材とした。各構造物の架設または設置場所を図 5 に示す。試験片の貼付位置は図 6 に示すように各構造物の主桁に該当する I 桁の腹板外側および下フランジ下面とし、粘着テープおよび熱伝導シートを用いて試験片を貼付した。暴露期間は約 1 年間とし、暴露後の試験片に対して、塗装腐食鋼板の塗膜膨れ面積率と裸鋼板の侵食度を算出した。

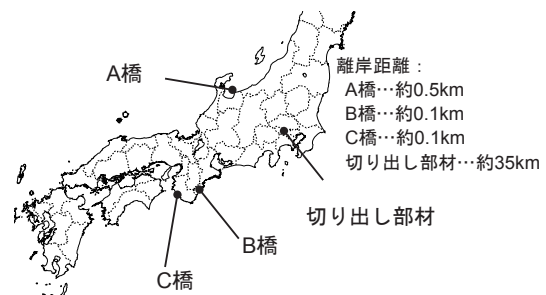
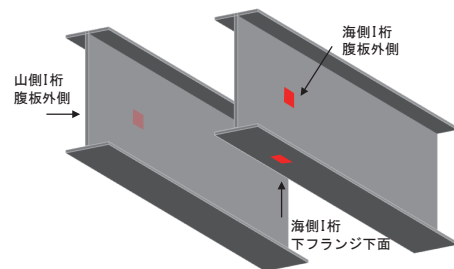


図5 対象構造物の架設・設置場所



注：切り出し部位では、海側桁ではなく南面側桁とした。

図6 試験片の貼付位置

試験結果を表 1 に示す。設置場所別に比較すると、切り出し部材に貼付した場合には貼付位置による大きな違いが見られないのに対して、A 橋～C 橋に貼付した場合には、最も腐食度の大きい裸鋼板と塗装腐食鋼板の貼付位置が異なった。裸鋼板の場合、雨洗効果の期待しにくい下フランジ下面で最も侵食度が大きくなる傾向がみられた。これは、当該部位において海塩由来の塩分が滞留・蓄積されたためと考えられる。塗装腐食鋼板の場合、切り出し部材では南面を向く腹板面、A 橋～C 橋では海を向く腹板面で最も大きな膨れ面積率を示す傾向にある。この要因として、日照に伴い昇温することで腐食反応が促進されたことや、海側を向く部材のため海塩の付着量が多く、潮解によって濡れ時間が長くなり、塗膜を通じる水分量が多くなることで腐食しやすい状況になったことが推定される。

表1 暴露1年後の侵食度と塗膜膨れ面積率

試験片の貼付位置 ^{注1}	A橋		B橋		C橋		切り出し部材 ^{注2}		
	条件a	条件b	条件a	条件b	条件a	条件b	条件a	条件b	
裸鋼板の侵食度	部位①	0.04mm	0.11mm	0.04mm	0.02mm	0.02mm			
	部位②	0.06mm	0.16mm	0.13mm	0.02mm	0.02mm			
	部位③	0.02mm	0.10mm	0.10mm	0.01mm	0.01mm			
塗膜変状面積率	部位①	15%	35%	20%	40%	16%	38%	0.1%	7%
	部位②	10%	13%	10%	17%	9%	15%	0%	4%
	部位③	1%	13%	10%	20%	7%	30%	0%	4%

注1：部位①…海側I桁腹板外側，部位②…海側I桁下フランジ下面，部位③…山側I桁腹板外側
 注2：切り出し部材では，部位①を南側I桁腹板外側（南方向），部位②を南側I桁下フランジ下面，部位③を北側I桁腹板外側（北方向）とした。
 注3：条件a,bは鋼板の腐食条件である。a…0.01wt% 塩水噴霧，b…0.05 wt% 塩水噴霧

続いて、各構造物において裸鋼板の最も高い侵食度と塗装腐食鋼板の塗膜膨れ面積率の関係を図7に示す。切り出し部材に設置した試験片の侵食度および塗膜膨れ面積率は鋼鉄道橋に設置した試験片の値と比較して著しく小さくなり、各構造物の腐食状況を再現していると言える。また、塗膜膨れ面積率は裸鋼板の侵食度に対して線形の関係になっていない。これは図2で示したように、塗膜膨れ面積率の増加程度は徐々に緩やかになる傾向にあるためと考えられる。このことから、ある程度以上の腐食性環境に1年間暴露した塗装腐食鋼板は、同程度の塗膜膨れ面積率に達するものと考えられる。本試験では塩水濃度を0.01wt%として作製した塗装腐食鋼板では15%以上、塩水濃度を0.05wt%として作製した塗装腐食鋼板では35%以上であった。これらの値をしきい値とすることで、塗膜下腐食の発生しやすい鋼鉄道橋であるか否かを評価できる。

以上の結果から、LCC評価法の適用対象とする鋼鉄道橋の選定手法として、塗装腐食鋼板を用いた手法が適当と考えられる。

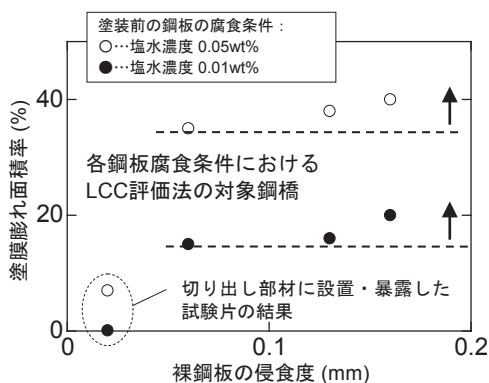


図7 侵食度と塗膜膨れ面積率

3. 塗替えに関する実用的な LCC 評価法の提案

3.1 評価式とパラメータ

塗替えに関する鋼鉄道橋の LCC は、塗替え対象鋼橋の状況および期待される塗替え周期に基づいて算定される塗替え施工費用と、塗装系の推定耐久年数から算出できる。1回の塗替え施工に要する費用を式(3)に示す。ここで、 C は塗替え施工の総費用、 C_a は素地調整費用、 C_b は塗装費用、 C_c は塗料費用、 C_d は足場架設費用、 C_e は保安費などのその他の費用、 d は諸経費率を示す。

$$C = (1+d)(C_a + C_b + C_c + C_d + C_e) \quad (3)$$

また、LCC では将来に渡る費用を積算するため、異なる時間軸上の費用を取り扱う必要がある。一般に、将来要する費用を現在価値に置き換える現価法を用いて評価する機会が多い。現価法は式(4)で示される。ここで、 C_t は t 年後における塗替え施工費用であり、 r は割引率である。本検討では、既往の文献を参考にして割引率を4%に設定した⁶⁾。また、 t は塗替え周期であり、適用する塗装系の推定耐用年数となる。

$$C_{total} = \sum \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

3.2 モデル鋼橋への適用

前節の LCC 算出式に基づき、代表的な構造形式のモデル鋼橋に対して手・動力工具またはブラストを適用して塗替えした場合の LCC を試算し、適切な塗替え施工方法を検討した。ここでは、各塗替え施工方法によって大きく費用が変化する項目である、塗料費用、素地調整費用、塗装費用、足場架設費用を対象とした。

3.2.1 モデル鋼橋の設定

モデル鋼橋は、鋼鉄道橋として一般的な形式である上路プレートガーダ、下路プレートガーダ、下路トラスの3種類とし、実在する鋼鉄道橋の構造を模した。各モデル鋼橋の塗装面積および足場面積を表2に示す。

足場面積とは、鋼橋の投影面積および作業時の補正係

表2 モデル鋼橋の概要

鋼橋記号	鋼橋 A	鋼橋 B	鋼橋 C
形式	Gd	Gt	Tt
主構幅 (m)	1.4	5.8	4.7
支間長 (m)	20	26	64
塗装面積 (m ²)	軌道上	20	100
	軌道下	210	750
足場面積 (m ²)	床部分	70	200
	側面	80	140
			4100

注：鋼橋の記号は次の通り。Gd…上路プレートガーダ，Gt…下路プレートガーダ，Tt…下路トラス

数などを考慮して算出される値である。ここで、軌道面より上部の部材については、素地調整作業や塗装作業を夜間や間合いで実施する必要上、通常の作業単価よりも高額となることから、軌道面を境に塗装面積を区分した。

3.2.2 塗替え費用の算出条件

素地調整費用および塗装費用の算出については、国鉄時代の塗装工（塗替）積算要領に記載される各作業の歩掛（ぶがかり）等を参考にした。素地調整時に鋼材を露出させる面積率（替ケレン種別と呼ぶ）によって素地調整費用や塗装費用が変動するため、替ケレン種別の歩掛が設定されている。ただし、ブラストによる素地調整費用については現段階で公的な歩掛が存在しない。そこで施工実績を参考に、準備・片付け時間を除くブラスト時間を4時間とし、作業量については廃用部材を用いたブラスト試験を実施し、その結果から日中での作業量を約20m²/day、夜間では作業時間が短いために約12m²/dayとした。

適用する塗装系は、手・動力工具を用いた素地調整で腐食生成物が残存する場合には塗装系Tを用い、ブラスト工法などの適用により腐食生成物をほとんど除去する場合にはジンクリッチ系塗料を用いた塗装系Jを用いた。塗装系Jは塗装系Tよりも1.5倍ほど塗料単価が高くなるが、施工後に塗膜欠陥部からの腐食の発生を抑制することができるなど、より防食性能に優れた塗装系である。

足場架設費用は桁構造により変動することから、施工実績を参考に施工単価を設定した。ブラストを適用する場合には研削材や粉化した塗膜・さびの飛散を抑制するため、作業範囲を密閉状態にするための養生が必要となる。このため、手・動力工具を用いる場合の足場用ネットをシートに変更すると仮定して費用を設定した。

3.2.3 塗替え周期と素地調整程度の設定

塗替え周期を算出する場合、素地調整程度と、適用する塗装系種別を設定する必要がある。ここでは、①動力工具処理による素地調整、②動力工具処理だが完全にさびを除去する素地調整、③ブラスト処理による素地調整、といった3種類の条件を設定した。各条件の施工概要を表3に示す。

・条件①：動力工具処理

一般的な施工条件であり、著しく腐食した鋼材では腐

表3 各条件の施工概要

条件	①	② ^{注1}	③
素地調整方法	手工具・動力工具	ブラスト工法	
腐食生成物の除去程度	残存	概ね除去	
塗装系	塗装系T	塗装系J	
塗替え周期（年）	5	15	
鋼材露出面積率（%）	25	100 ^{注2}	

注1：条件②では、2回目以降の塗替えには条件①を適用する。
注2：初回のみ100%の鋼材露出面積率であり、2回目以降は1%に設定した。

食生成物が残存する。適用する塗装系は塗装系Tであり、2.4節の暴露試験結果から、約1年程度で塗膜下腐食の発生が懸念される。このため1～2年程度で塗替えるべきだが経済的事情を考慮して塗替え周期を5年と設定した。したがって部材の腐食が進行し、今後、補修・補強工事が必要となる。素地調整時の替ケレン種別は、替ケレン-3（鋼材の露出面積率25%）とした。これは塗替え適正時期にあたる塗膜劣化状態に適用されるものである。

・条件②：動力工具処理だが完全にさびを除去

初回の塗替え施工時に動力工具を用いて腐食生成物を完全に除去し、2回目以降の塗替え施工時には条件①の施工方法を適用する条件とした。腐食生成物を完全に除去することで塗膜下腐食は進行しないと仮定できるが、素地調整時の作業速度を考慮して、本条件の素地調整の歩掛を条件①の約20倍に設定した。

塗装系Jの塗替え周期について、新設時に塗装系Jを適用した鋼鉄道橋の調査事例⁷⁾から考察した。腐食性の高い環境で約35年が経過しても大部分の塗膜は健全である一方で、施工不良箇所や、飛石等の外力の作用による塗膜損傷箇所からの腐食により、架設から15年後に部分的な塗替えが実施されている。このように、素地状態や塗膜の耐久性以外の要因で塗替えられた実態を考慮して、塗替え周期を15年に設定した。

・条件③：ブラスト処理

替ケレン-1（鋼材露出面積率100%）による全面ブラスト工法を適用する条件とした。条件②と同様に塗装系Jを適用するため、塗替え周期を15年に設定した。鋼橋全体の腐食生成物を概ね除去することから、条件②と比較しても2回目以降の塗替えでは腐食面積が極めて小さくなるとし、鋼材露出面積率を「鋼構造物塗装設計施工指針⁸⁾」2005年版に記載される塗替え時の最小値(1%)として素地調整費用、塗装費用および塗料費用を算出した。ただし、腐食の発生は鋼橋全体であると考えられるため、足場は鋼橋全体に設置する条件で足場架設費用を設定した。

3.2.4 モデル鋼橋でのLCCの試算

提案したLCC評価手法をモデル橋梁に適用した場合の塗替え施工費用の施工単価を表4に示す。

表4に基づいて試算した初回の塗替えから100年間の施工費用の積算結果を図8に示す。これより、全ての

表4 各費用項目の単価（塗装面積1m²当たり）

条件	条件①			条件②			条件③		
	Gd	Gt	Tt	Gd	Gt	Tt	Gd	Gt	Tt
塗料費用（千円/m ² ）	1.1			1.8			2.1		
塗装費用+素地調整費用（千円/m ² ）	2.8	2.5	2.9	51.8	45.6	52.7	20.4	15.9	17.5
足場架設費用（千円/m ² ）	3.6	4.3	4.7	3.6	4.3	4.7	3.7	4.4	4.7

注：鋼橋の記号は次の通り。Gd…上路プレートガード、Gt…下路プレートガード、Tt…下路トラス

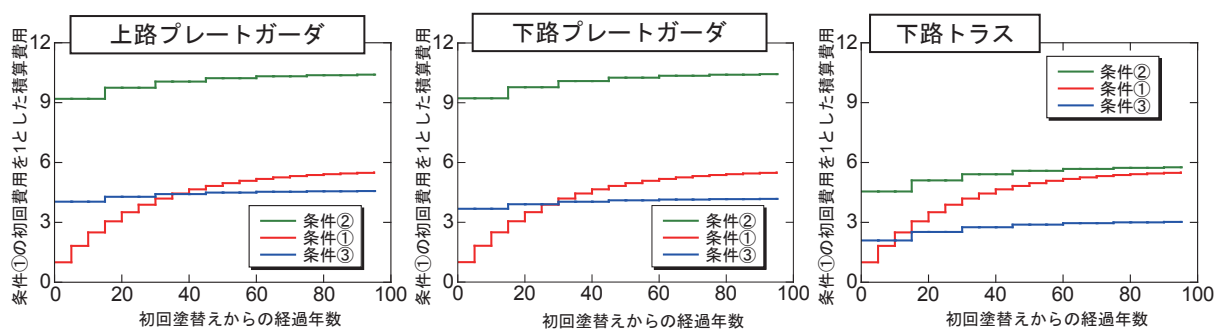


図8 初回の塗替えから100年間の施工費用の積算結果

モデル鋼橋において、1回目の塗替え施工費用が最も小さいのは一般的な施工方法の条件①だが、腐食の進行による部材の減肉が懸念されるほか、施工費用を積算していった場合には条件③よりも高額となった。このような逆転は、足場面積の大きい下路トラスにおいて早期に起きた。条件②については、年数の経過とともに費用差は減少する傾向にあるものの、初回の塗替え施工費用が高額であるため、設定期間内におけるLCCは全条件の中で最も高くなった。

以上の結果から、供用年数が比較的短い鋼鉄道橋では腐食の進行が懸念されるものの従来通りの条件①で塗替えするのが最も経済的であるが、長期間供用する鋼鉄道橋ではブラスト工法を用いて入念な素地調整を実施することにより、鋼材の過度な腐食を生じさせずにLCCを低減できる可能性を得た。特に、構造形式が足場面積の大きいトラス構造の場合には、この傾向が顕著であることが分かった。

4. おわりに

鋼鉄道橋の塗替え施工に関するLCCを評価し、腐食性の高い環境に架設されている鋼鉄道橋の適切な塗替え施工方法を提案することを目的としてLCC評価法の適用対象とする鋼鉄道橋の選定手法について検討するとともに、塗替えに関する実用的なLCC評価法を提案し、LCCの観点から適切と考えられる塗替え施工方法について検討した。以下に、得られた知見を述べる。

- 1) LCC評価法の対象鋼橋を選別する手法として、鋼橋部材に設置・暴露した塗装腐食鋼板の塗膜変状程度により、鋼橋の腐食速度を評価する手法を提案した。
- 2) 塗替えに関するLCC評価法として、塗替え施工費用に対して塗装系の推定耐久年数や原価法を考慮した評価法を提案した。
- 3) 提案したLCC評価をモデル橋りょうに適用した結

果、構造形式によるが、今後10～35年以上供用する場合にLCCを低減できる塗替え施工方法は、素地調整にブラスト工法を用いた方法であることを示した。

謝辞

本検討を進めるにあたり、多大なる協力をいただいた九州大学 貝沼准教授、西日本旅客鉄道株式会社、東海旅客鉄道株式会社に深く謝意を表する。

文献

- 1) 貝沼重信, 山本悠哉, 林秀幸他: 腐食生成物層の厚さをを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法, 材料と環境, Vol.61, No.12, pp.483-494, 2012
- 2) 田中誠: 鉄道総研式複合サイクル試験による塗膜性能評価, 防錆管理, Vol.47, No.6, pp.205-214, 2003
- 3) 坂本達朗, 貝沼重信, 小林淳二: 塗装前の炭素鋼基材のさび性状と塗膜耐久性の関係に関する基礎検討, 材料と環境, Vol.64, No.7, pp.307-310, 2013
- 4) 坂本達朗, 太田達哉, 貝沼重信: 室内促進劣化試験における塗装さび鋼板の質量変化量評価, 鋼構造年次論文報告集, Vol.25, pp.504-509, 2014
- 5) 紀平寛, 原田佳幸, 田辺康児他: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780, I-70, pp.71-86, 2005
- 6) 杉本一郎, 杉籠政雄, 田中誠他: 鋼鉄道橋のLCC評価に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol.15, No.8, pp.47-52, 2001
- 7) 坂本達朗, 園佳寿郎, 後藤宏明他: 実橋りょうに適用した長期耐久型塗装系の追跡調査(その1), 鉄構塗装技術討論会発表予稿集, Vol.35, pp.1-6, 2012
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所: 鋼構造物塗装設計施工指針, p.108, 2005