

鋼橋塗装の部分劣化対策に関するライフサイクルアナリシス

Lifecycle analysis concerning partial deterioration measures of steel bridge painting

細井章浩*, 伊藤義人 **, 金子恵介***, 杉浦友樹****
Akihiro Hosoi, Yoshito Itoh, Keisuke Kaneko, Yuki Sugiura

*大学院生, 名古屋大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

**工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

***工修, JR 東日本 東京工事事務所 東北・常磐 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号 JR 新宿ビル) (当時名古屋大学大学院学生)

****工修, 株式会社 NTT データ (〒135-6033 東京都江東区豊洲 3-3-3 豊洲センタービル) (当時名古屋大学大学院学生)

Steel bridges are usually prevented from corrosion by painting. In the corrosion prevention by the painting, a difference occurs in the performance by geographical environment and structural parts, and the painting has structural weak parts. As solution methods to reduce the difference, there are edge processing and partial repainting afresh of the weak parts. This study investigated lifecycle cost and lifecycle environmental impact when the solution method of the partial deterioration of the painting is used, and evaluated the lifecycle performance.

Key Words: steel bridge painting, partial repainting afresh, edge processing, lifecycle cost

キーワード: 鋼橋塗装, 部分塗替え, 角部加工, ライフサイクルコスト

1. はじめに

近年, 公共事業費削減などにより橋梁のライフサイクルコスト (以下, LCC) の低減が求められている。また, 地球温暖化に代表されるような環境問題への関心の高まりから橋梁に関しても環境負荷の低減が求められており, 二酸化炭素 (CO₂) や塗料に含まれる揮発性有機物質 (VOC) のライフサイクル全体での低減も求められている¹⁾。このように橋梁に求められる要求性能は多様化・複雑化しており, 維持管理段階でコストや環境負荷への影響が大きい防食に関しても, 同様に検討が必要となっているため, LCC, 二酸化炭素排出量, および揮発性有機物質を指標とした橋梁のライフサイクル環境負荷 (LCCO₂) などの定量的な試算が行われている^{2)~4)}。

鋼橋は, その維持管理において防食対策が必要であり, 一般に塗装により防食が行われている。塗装は鋼材表面に形成した塗膜が酸素や水および塩化物イオンなどの腐食を促進する物質を遮断することによって, 鋼材を保護する防食方法であり, 時間の経過とともに塗膜が劣化し防食性能が低下する。一般塗装系に比べて塗装寿命が長い重防食塗装系においても防食性能が低下するまでの期

間は橋梁の供用期間に比べて短いため, 供用期間中に防食性能を維持するためには, 塗装の塗替えを行う必要がある⁵⁾。

塗膜の劣化やその後の鋼材の腐食については, 橋梁全体について一様に生じるものではない。鋼橋の腐食で問題となるのは鋼板表面に生じる均一な腐食だけではなく, 材端部や部位が組み合わさったような部位に生じる局所的な腐食も考慮する必要がある⁵⁾。この局所的な腐食は素地調整や塗付作業などの施工環境や, 降雨による洗浄作用の有無, 漏水や水の滞留や湿気のこもりなどの構造的要因に大きく影響される。また, その他の塗膜劣化要因としては, 架設環境, 塗装系, 塗装履歴などが大きく影響していることが実橋調査などによって報告されている^{6)~9)}。塗装などの被覆による防食では, 道路橋示方書¹⁰⁾に従えば, 鋼材を腐食させないことが原則であり, 鋼材の腐食による板厚減少のリスク管理の観点からいえば, 塗膜の劣化が進み, 鋼板素地の腐食が開始する前に塗装を塗替える必要がある。

一方, 鋼橋の塗替え塗装を行う際には, 作業足場および防護シートが必要となる。部分的に塗替え塗装を行う場合でも, 一般には塗装面積に対して足場が大掛かりな

ものとなることから、それを繰り返すことによる足場費の増加のため、従来、全面塗替えの方が良いとされていた。また、鋼橋管理者の中には、塗膜の劣化や鋼材の腐食の著しい部位（以下、弱点部と称す）について全面塗替えの際に増し塗りを行い、弱点部の防食性能を高めることにより、鋼橋の防食性能の均一化を図ろうとする動きもある。しかし、増し塗りによる防食性能の向上について、その効果を定量的に解明した例^{11), 12)}は、2年程度の短期間のものに限られ、また増し塗り方法についても、ガセット部などを除き一般化されているとは言い難い。

また、塗膜の弱点部としては、鋼板エッジやボルト部の角部が良く知られており、その対策として、角部の面取り加工や局面加工といった角部加工が推奨されている。清水ら¹³⁾の実験によって角部加工による防食性能の向上は実証されているが、そのことによる鋼橋塗装系の塗替え周期に与える影響は、まだ評価されていない。

一方、弱点部の部分塗替えについては、2005年の鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁴⁾の改訂に伴い、それ以前は全面塗替えを行うまでの応急処置としての位置づけであったが、改訂後は「全面塗替えと部分塗替えについては、長期的な維持管理費を算出して、経済性の観点から検討を行い、その上で判断を行う」とされ、部分塗替えも1つの選択肢として扱われるようになった。しかし、現状としては支承などの取換えの際に、周辺部の部分塗替えが行われる例が見られる程度である。

林田ら¹⁵⁾による部分塗替えと全面塗替えのLCCについての算定によれば、部分塗替えによってLCCが抑えられるとされているが、環境条件や素地調整程度などの塗膜劣化要因が一定環境下のもとでの算定結果である。しかしながら、文献16)によれば塗膜劣化要因の主なものとしては、橋梁の(1)構造部位、(2)架設環境、(3)塗装系、(4)素地調整、(5)塗装施工、および(6)塗装履歴などとされており、それらの影響度合いを考慮したLCCの算定は行われていない。そこで本研究では、まず、角部加工の塗替え周期に与える影響度合いを評価し、続いて、(1)構造部位、(2)架設環境、(4)素地調整、および(6)塗装履歴について着目し、部分塗替えを行った場合のLCCおよびライフサイクル揮発性有機物質排出量(以下、LCVOC)の算定を行い、全面塗替えのみの場合との比較検討から橋梁の塗装による防食に関するライフサイクル性能改善の可能性を考察する。なお、LCCO₂に関しては、防食に関しては、大きな要素にならない^{4), 17)}ので、ここでは取り扱わない。

2. LCC および LCVOC の算定条件

2.1 塗装弱点部の設定

塗装の部分劣化対策によるLCCおよびLCVOCの影響度合いの算定を行うためには、どの部分に対しどのよう



図-1 下フランジの発錆事例

表-1 部位別面積比率

部位名称	部位別面積比率 (%)
一般部	58.0
下フランジ・添接部	16.4
対傾構	10.2
横構	6.8
桁端・支承	8.6
全体	100

な部分劣化対策を行うか、また、その実施時期を設定する必要がある。

旧日本道路公団が管理する全国の橋梁の中から624橋を抽出して行われた松田らの塗膜の劣化実態調査^{6)~8)}や名取らの腐食事例調査⁹⁾などによれば、塗膜の弱点部としてあげられるのは、図-1に示すような下フランジや添接部、桁端部、対傾構、横構、および支承部といった部位である。添接部や二次部材が他の部位に比べてさびが早期に発生するのは、ボルトや角部において塗装の表面張力の影響により一般部に比べ規定の塗膜厚を確保しづらいこと、構造上、結露が発生しやすいことや雨水に曝され易いことが原因と考えられる。また、林田ら¹⁸⁾の調査によれば、素地調整を十分に行いきにくい部位についても早期に劣化が進行することが確認されている。

以上を考慮して本研究では、下フランジ、添接部、桁端部、対傾構、横構、および支承部を弱点部とし、角部も弱点部の主要因の一つとして検討する。

鋼板角部の塗膜厚を確保するための方策として、角部形状の改良を行う角部加工が推奨されている。清水ら¹³⁾はA-5塗装系において、角部加工を行っていないE0、角部を辺長1mmで面取り加工したE1、およびR=2mmで曲面加工を行ったR2について環境促進実験を行い、角部加工によって塗膜厚が増加し、防食性能が向上することを定量的に明らかにしている。

ここでは、プレートガーダー橋の角部加工の影響を算定する事例として、名古屋市西部の庄内川に架かる新大

表-2 設定環境別・部位別塗装寿命比率

	全環境	河川上	交差道路上	側道隣接地	住宅地	田園・山間
一般部	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
下フランジ・添接部	0.43	0.47	0.50	0.32	0.40	0.44
対傾構	0.68	0.71	0.71	0.67	0.61	0.71
横構	0.62	0.67	0.61	0.61	0.55	0.64
桁端・支承	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

正橋（橋長：308m，離岸距離 6km）の 1 径間（スパン長：46m）を用いる。対象スパンの総塗装面積は 3668m²，総角部長さは 6623m である。また，部分塗替えの効果の算定においては，林田らの試算¹⁵⁾に用いられた北海道開発局が管理する橋梁の最頻度パターンモデルケースを参考として，各部位の面積比率については表-1 に示すように設定した。なお，表中の一般部とは，上記の弱点部を除く塗装対象部の全域である。

塗替え塗装において，コスト面で大きなウェイトを占め足場費用は，単位塗装面積当たり 3000 円¹⁵⁾ とし，桁端部および支承部のみを塗替える場合については足場は不要とした。

2.2 設定環境

架設環境によるさびの発生は，一般に海上および海岸付近が一般環境（都市，田園，山間部）よりも早い。これは，飛来した海塩粒子が塗装表面に付着し，その潮解性により大気中の水分を吸着することでぬれ時間が多くなることや付着塩分が電解質として働き，さびの発生が促進されるためと考えられている¹⁶⁾。また，大気汚染物質である亜硫酸ガスも海塩粒子と同様の働きをすることによってさびの進行が早くなると考えられている。

以上のような地域差を考慮するため，部分塗替えの算定では，設定環境を全環境，河川上，交差道路上，側道隣接地，住宅地，および田園・山間の 6 地域とし，松田らの調査結果^{6), 7), 8)}をもとに一般部と比した各弱点部の塗装寿命の比率を設定環境ごとに算出した。また，桁端部・支承部については文献 16)を参考にして塗装の寿命を一般部の 1/2 とした。表-2 にそれぞれの設定環境における一般部の塗装寿命を 1 とした場合の弱点部の塗装寿命比率を示す。なお，参考とした調査^{6), 7), 8)}における海上海岸はサンプル数が少なく，また，飛来塩分量によって規定される促進倍率を環境促進実験の実験日数である基準日数に乗ずることにより，塩分の影響は反映されるため，海上海岸環境は設定していない。詳細は 2.4 を参照されたい。

2.3 塗装条件

角部加工の橋梁全体系への影響度合いの算定においては，清水ら¹⁵⁾の実験によって角部加工の防食性能向上が良好に把握された A-5 塗装系によって行う。



図-2 桁端部の状況



図-3 支承部の状況

塗替え塗装においては，2005 年に改訂された鋼道路橋塗装・防食便覧¹⁴⁾において重防食塗装系を適用することが推奨されており，技術者へのヒアリングにおいても塗替え塗装では重防食塗装系である C 塗装系を用いているとの結果を得たので，部分塗替えの影響度合いの算定では C 塗装系により塗替え塗装を行うとする。また，塗替え塗装においてはさびの除去が重要であり，1 種ケレンにおいても，施工上の問題で，目標とする素地調整レベルに達しない場合があり，塗膜劣化に悪影響を与えることが報告されている¹⁹⁾。

本研究では，施工環境が良好な位置では 1 種ケレンが適用されるとして Rc-I 塗装系（素地調整 1 種）とし，一方，図-2，3 に示すように桁端部および支承部といったケレン施工が困難な位置ではプラスト処理による 1 種ケレンを行うスペースを確保できない場合があるため，動力工具および手工具を用いた 3 種ケレンが適用されると

表-3 塗替え塗装の原単位

		一般部	下フランジ・ 添接部	対傾構	横構	桁端・支承	全体
塗装	塗装系	Rc-I				Rc-III	-
	単価 (円/m ²)	3250				2925	-
	橋梁 1m ² 当たりの費用 (円)	1816	533	333	219	253	3155
足場	単価 (円/m ²)	3000				0	-
	橋梁 1m ² 当たりの費用 (円)	1676.7	492.3	307.2	202.5	0	2679
素地調整	ケレン程度	1種				3種	-
	単価 (円/m ²)	3770				770	-
	橋梁 1m ² 当たりの費用 (円)	2107	619	386	254	67	3433
VOC	原単位 (g/m ²)	286				330	-
	橋梁 1m ² 当たりの排出量 (g)	160	47	29	19	29	284

して Rc-III 塗装系（素地調整 3 種）とした。表-3 に、Rc-I 塗装系および Rc-III 塗装系のコストと VOC の原単位を示す。

部分塗替えの基本ケースとしては、桁端部および支承部については 3 種ケレン、その他の部位については 1 種ケレンを想定しているが、コストの関係上、1 種ケレンが行える環境下においても 3 種ケレンで塗替えが行われることが往々にあることや、橋梁によっては桁端部および支承部においても 1 種ケレンを行える環境が整っている場合もあるため、全部位同一の素地調整程度の場合の算定も行った。

2.4 塗膜の劣化予測

塗膜劣化曲線については塗替え時期を判断する 10～20 年程度の実用的な範囲内であれば、2 次曲線によって劣化傾向は把握できるとされている²⁰⁾。本研究では、塗膜劣化曲線として、金ら²¹⁾による実験より得られた知見をもとに A-5 塗装系と、C 塗装系の一種でポリウレタン樹脂上塗塗料を用いた C-2 塗装系における新規塗装の劣化曲線として図-4 に示す塗膜劣化曲線を設定した。縦軸は塗膜劣化面積率、横軸は基準日数である。

塗替え塗装においては、施工中に結露や塩分などの付着物を巻き込んで塗装した場合、塗膜の層間付着性が低下したり、経時での塗膜のはがれやその後の発錆に至ることがあり、文献 16) では、部位によって差はあるが、塗替え塗装の塗装寿命は新規塗装に比べ約 8 割程度の期間とされている。さらに、下フランジのように足場との間隔が十分に取れず作業性が悪いことや素地調整の品質が新規塗装に比べ悪くなることなどから、良好な塗膜が得にくい場合がある。また、3 種ケレンでは完全にさびを除去することは困難であり、さびが残存している表面に塗装することになるため防食性能が低下する。伊藤ら²²⁾は 1 種ケレンに対し 3 種ケレンでは寿命が 36% 以下となることを報告している。このことから算定において、

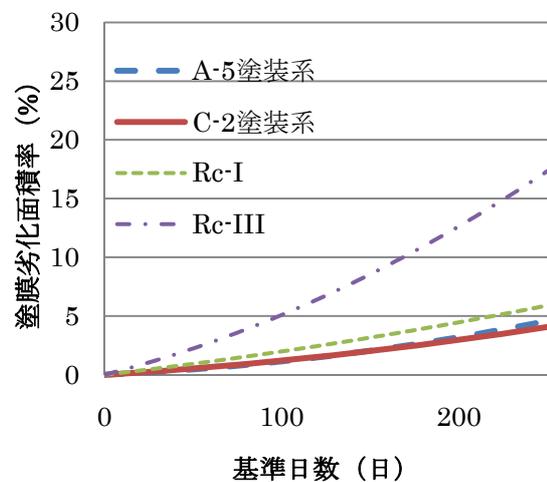


図-4 基本劣化曲線

塗替え塗装時の劣化曲線としては、1 種ケレンを行う部位については新規塗装の 80% の寿命を想定し、3 種ケレンを行う部位については新規塗装の 36% を想定し劣化曲線を作成した。それぞれの劣化曲線を図-4 に示す。

弱点部の部位ごとの劣化曲線については、図-4 の基本塗膜劣化曲線に対して、2.2 で示した設定環境別部位別の塗装寿命比率を掛け合わせることで、部位別劣化曲線を設定環境ごとに作成した。式 (1) に立地環境別、部位別の劣化曲線の算出方法を示す。

$$C_p = C_s \times A_1 \times A_2 \quad (1)$$

ここで、 C_p は立地環境別、部位別の劣化曲線、 C_s は新規塗装系の劣化曲線、 A_1 は立地環境別、部位別の塗装寿命比率、および A_2 は素地調整別の塗装寿命比率を表す。なお、新規塗装系としては、A-5 塗装系と C-2 塗装系を想定し、素地調整別の塗装寿命比率は、新規の場合を 1 とし、塗替え塗装の素地調整レベルが 1 種ケレンの場合

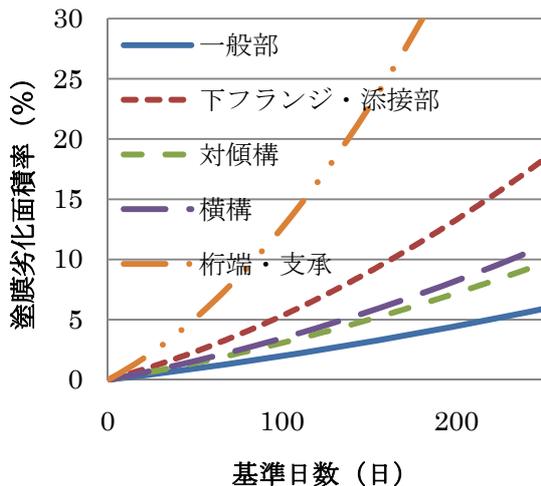


図-5 塗替え塗装における立地環境別、部位別の劣化曲線（全環境）

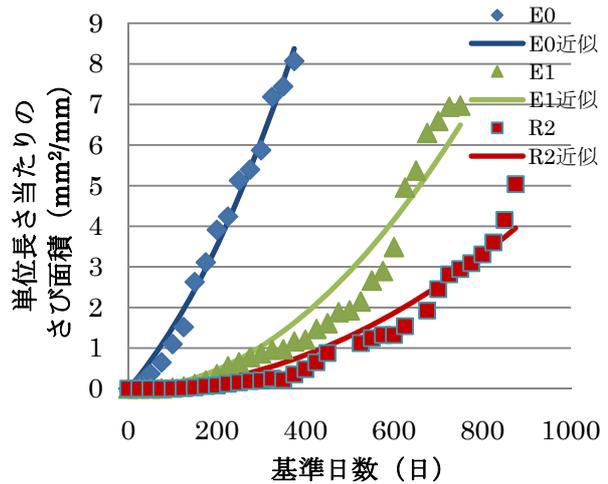


図-6 角部の塗膜劣化曲線（A-5 塗装系）

を0.8, 3種ケレンの場合を0.36としている。代表例として全環境における塗替え塗膜劣化曲線を図-5に示す。

また、角部加工効果の算定においては、清水ら¹³⁾の環境促進実験の結果を単位長さあたりのさび面積に換算し、検討を行った。単位長さあたりのさび面積とは、角部からの発生面積を角部の長さで除した値である。角部形状ごとの塗膜劣化曲線を図-6に示す。

伊藤ら²³⁾は、5%濃度の塩水噴霧、湿潤、および温度の異なる2種類の乾燥からなる複合サイクル条件であるS6サイクルを条件とした環境促進実験と国内31箇所で行われた屋外暴露試験との相関性に関して、無防食鋼板の腐食による板厚減少量に基づいて、式(2)の促進倍率 A_c で表すことを提案している。基準日数に促進倍率 A_c を掛けると実環境における期間が算出される。

$$A_c = 9.14W_s^{-0.62} \quad (2)$$

ここで、 W_s は実環境での飛来塩分量(mdd)である。また、金ら²⁴⁾により、塗装鋼板においても式(2)が適用できることも示されている。本研究の算定においては、式(2)に鋼橋建設地の飛来塩分量を代入することにより促進倍率 A_c を求め、基準日数に掛けることにより、飛来塩分量の異なるそれぞれの実環境における日数に換算した。

2.5 塗替え基準

塗替え時期には、重要な鋼橋などで橋梁の設計、建設段階において既に供用期間中の塗替え時期が規定されている「塗替え時期固定型」と、鋼橋の定期点検、検査において塗膜の劣化がある基準に達した場合に塗替えを行うとする「塗替え時期変動型」があり、橋梁の維持管理を行う事業主体ごとに定められている。前者のタイプにおいては、供用開始後の初期に塗膜劣化が軽微な段

階で塗替えを実施することとして、塗膜厚の厚膜化を図り、供用期間後期における塗替え周期の延伸を図り、LCCを低減する手法なども報告されている²⁵⁾。

鋼道路橋塗装・防食便覧では、点検により、さび、はがれ、変退色および汚れの各項目に対し、i)健全、ii)ほぼ健全、iii)劣化している、iv)劣化が著しい、の4段階で評価を行い、塗替え時期を決定するとしている。上記の項目において、塗膜の防食性能の低下を示すものとしては、さびとはがれが挙げられるが、評価の基準に関して定量的な記述はされておらず、現状では鋼橋の維持管理を行う事業主体ごとに基準が定められている。塗膜の劣化には、さびやはがれの他に光沢度の低下、ふくれ、われ、変退色、汚れおよび付着力の低下などが挙げられ、実際の鋼橋においてはこれらが複合したかたちで劣化が進行する。

文献26)では、上記を考慮して、塗替えの判断基準はさびの発生程度を主体に考え、塗替えの目的に応じてその他の劣化程度を加味することにより判定を行うことが合理的であるとしている。また、さび劣化程度の評価基準として「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV 03-1993」²⁷⁾のさび評価基準では、発生面積が0.3~5%に達した時点に塗替えを検討すべき時期としている。文献28)では、一般塗装系から重防食塗装系への切り替えの場合、さびの発生面積が5%以上になると部分的な孔食の発生が懸念され、施工部位によってはブラストによるさびの完全な除去が困難となるため、さび発生面積5%を塗替え最適時期としている。

以上のことを踏まえて、本研究の算定における塗替え基準は全体平均塗膜劣化面積率5%とする。ここで、全体平均塗膜劣化面積率とは、各部位のさび面積の総量である「さび量」を角部劣化曲線と総角部長さ、また部位別劣化曲線と部位面積から算出し、その合計値である

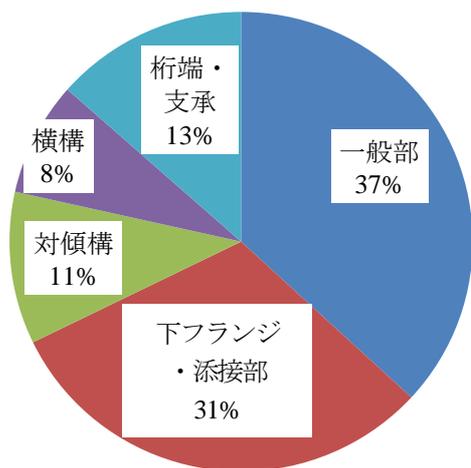


図-7 橋梁中の塗膜劣化面積の分布比率 (新規塗装)

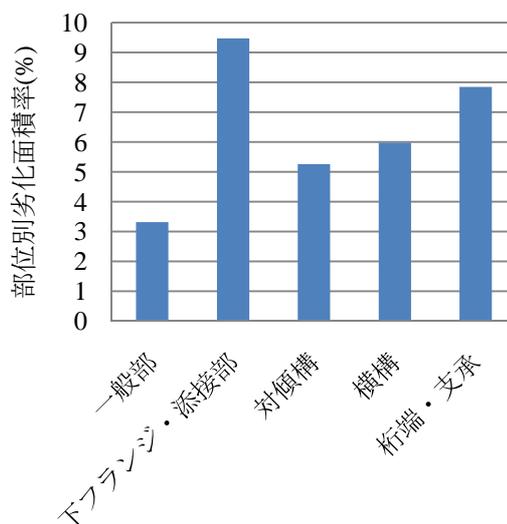


図-8 部位別塗膜劣化面積率

「総さび量」を塗装対象全面積で除した値である。それぞれのケースにおける総さび量の算出式を式 (3) および式 (4) に示し、全体平均塗膜劣化面積率の算出式を式 (5) に示す。

角部加工：

$$\begin{aligned} \text{総さび量} = & \text{角部劣化曲線} \times \text{総角部長さ} \\ & + \text{一般部劣化曲線} \times \text{一般部面積} \end{aligned} \quad (3)$$

部分塗装：

$$\text{総さび量} = \sum (\text{部位別劣化曲線} \times \text{部位面積}) \quad (4)$$

$$\text{全体平均塗膜劣化面積率} = \frac{\text{総さび量}}{\text{塗装対象全面積}} \quad (5)$$

図-7に角部加工を行っていない場合の新規塗装における全体平均劣化面積率 5%時の塗膜劣化面積の部位ごとの分布比率を示し、図-8にその際の部位ごとの劣化面積比率を示す。図-8より、一般部における劣化面積率は約3%であるため、一般部は防食能力をまだ保持した状態である。また、図-7より、一般部に比べ塗装面積の少ない弱点部に全体の約 2/3 のさび面積が集中していることが分かる。

2.6 シナリオの設定

鋼板の角部加工の鋼橋塗装系における影響度合いを評価するための算定においては、全体平均塗膜劣化面積率が 5%を超える時点を超えて角部形状ごとに算定し、橋梁全体系への影響を検討した。なお、この算定においては、A-5 塗装系を想定しているため、20年以内に架け替えが予定されている橋梁の最後の塗替え時に、角部加工を施した場合という限定された条件下での算定であること

を注記しておく。

また、部分塗替えの算定においては、前述のように、塗替え時期としては新幹線橋梁のような塗替え時期固定型と塗膜欠陥がある割合に達した時点を超えて塗膜寿命とする塗替え時期変動型があり、それぞれの塗替え時期のタイプに対応する部分塗替えの活用法が考えられる。そこで、2.5の塗替え基準を適用し、全面塗替えのみで塗替え塗装を行っていくシナリオと、塗替え時期のタイプごとに部分塗替えがライフサイクル全体で有効となるシナリオの計3つのシナリオを検討する。また、算定期間については、鉄道橋が100年以上の期間にわたって使用されていることや、更新を前提としたLCC最小のマネジメントが、道路橋には馴染まない²⁹⁾とされていることから、期間を区切らずに、半永久的に塗替え塗装が繰り返されると想定した。

(1) シナリオ1

全面塗替えのみで塗替え塗装を繰り返す。

(2) シナリオ2

新幹線橋梁のように、事業主体によっては、塗替え周期を固定した塗替えシナリオを採用している²⁹⁾。シナリオ2では、このような塗替え時期固定型の塗替え基準を想定し、シナリオ1の塗替え周期と同周期で、弱点部全部位の部分塗替えと一般部も含めた全面塗替えを交互に繰り返す。塗装足場については、部分塗替え時も全面塗替え時と同等の足場を用いると想定した。

(3) シナリオ3

現行の全面塗替えでは、一般部については健全な状態であるにもかかわらず、弱点部でさびが進行しているために塗替えが行われている状況である。したがって、弱点部において部分的に塗替えを行うことにより、全面塗替えの間隔を長くすることができると考えられる。橋梁の供用期間において、全面塗替えを行う回数を減少させることができれば、部分塗替えコストにも依存するもの

表-4 全面塗替えと部分塗替えの費用およびVOC排出量

	一般部	下フランジ・添接部	対傾構	横構	桁端・支承	費用 (円/m ²)	VOC (g/m ²)
全面塗替え	○	○	○	○	○	9266	284
部分塗替え	シナリオ2	-	○	○	○	5343	124
	シナリオ3	-	-	-	○	319	29

の、LCCを小さくできる可能性がある。また、実際に旧本州四国連絡橋公団の大型海上橋においては、点検作業と並行して部分塗替えが行われ、全面塗替え時期の延長が図られている²⁵⁾。そこで塗替え時期変動型の塗替え基準を想定し、塗替え基準時に塗装足場不要部位（桁端部と支承部）のみを塗替え、全面塗替え周期を引き延ばし、塗替えを繰り返すシナリオ3を想定した。

表-4に各シナリオにおける塗装対象部と費用およびVOCを示す。

3. LCCおよびLCVOCの算定結果

3.1 角部加工の橋梁全体系への影響

鋼板の端部に角部加工を行った場合に推定される塗装寿命の新大正橋を対象とした算定結果を表-5に示す。角部加工を行うことにより、1割ほど塗装寿命が延びるという結果となった。算定においては、塗膜劣化面積のみに着目しているが、実際においては、角部の塗膜が部分劣化したことによって、さびじりの発生やアノード分極が進むことによる腐食劣化の促進などの影響も考えられることや、算定において、ボルト部の角部加工も考慮していないため、算定結果より大きな塗膜寿命の延命効果があると考えられる。今後、それらの効果も勘案し

表-5 塗膜寿命

角部形状	塗装寿命比率
無加工(E0)	1.00
辺長1mmで面取り(E1)	1.08
R=2mmで曲面加工(R2)	1.09

た角部加工の影響度合いの検討が必要である。

3.2 各シナリオの評価

図-10と図-11に全設定環境の平均値である全環境と、シナリオ3による低減効果が最も少ない側道隣接地における各シナリオのLCCおよびLCVOCの経時変化を示す。なお、両図ともに横軸はシナリオ1における初回の全面塗替えまでの期間で無次元化を行い、縦軸に関しては全面塗替え1回分のコストとVOC量で無次元化を行っている。また、表-6に各シナリオの部分塗替え時および全面塗替え時における部位ごとの劣化面積率を示す。

図-10および図-11より、シナリオ2の塗装のLCCとLCVOCは、全面塗替えのみのシナリオ1に比べて、橋梁供用期間全体を通して下回っている。また、LCVOCに関してはシナリオ3と比較してもシナリオ2が最小値

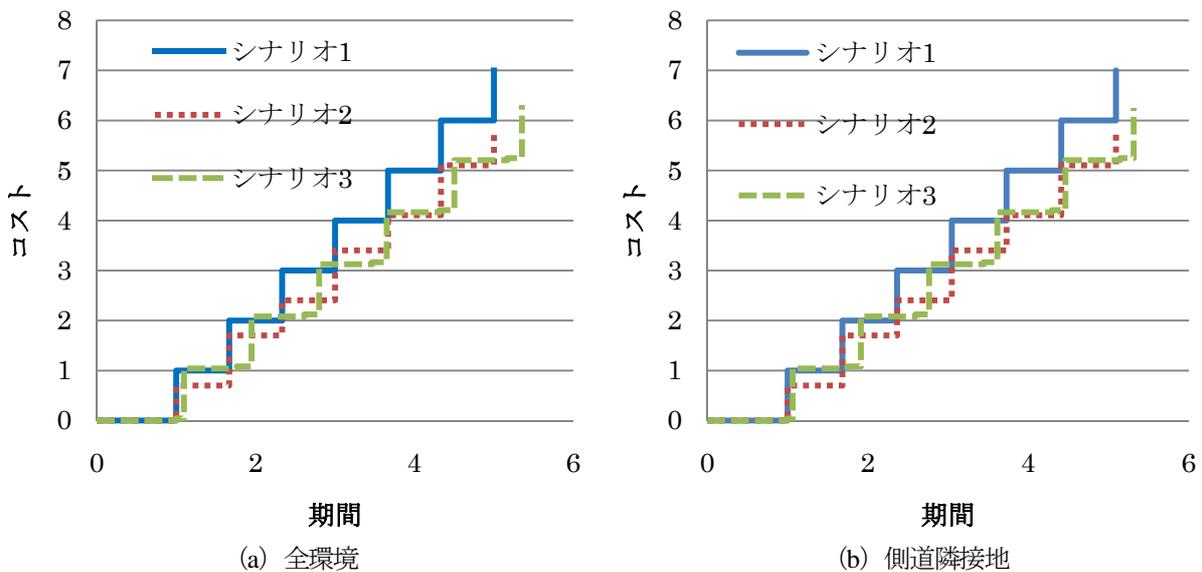


図-10 LCCの経時変化

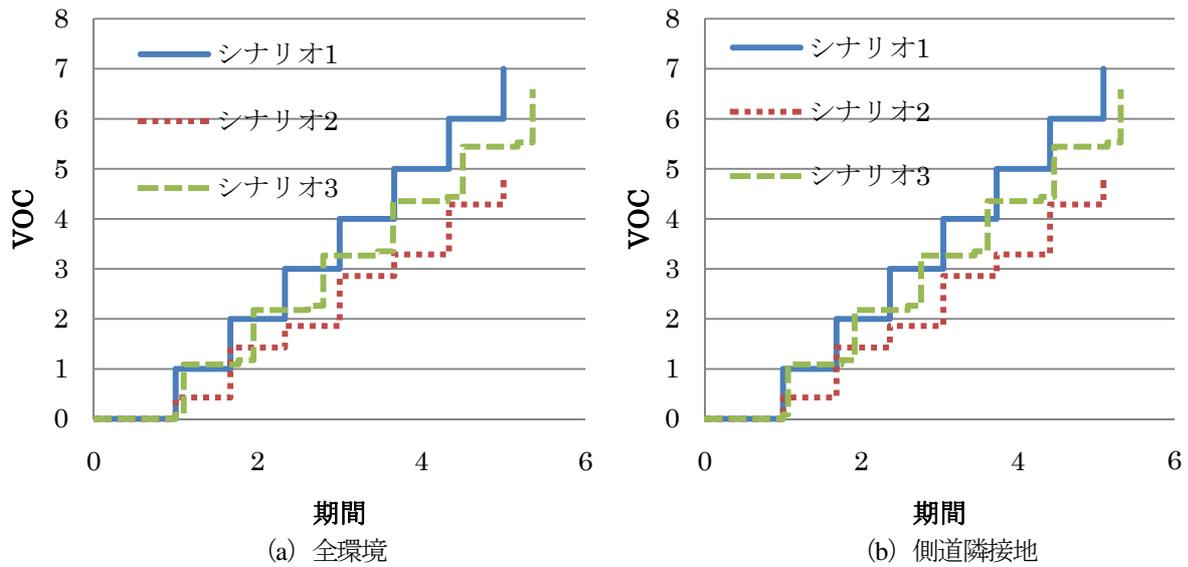


図-11 LCVOC の経時変化

表-6 塗替え時の部位別塗膜劣化面積率

		1回目		2回目		3回目以降	
		部分塗替	全面塗替	部分塗替	全面塗替	部分塗替	全面塗替
シナリオ1	経過期間	-	1.00	-	1.67	経過期間以外, 2回目と同様	
	塗膜劣化 面積率 (%)	一般部	-	3.32	-		2.65
		下フラン ジ・添接部	-	9.47	-		7.37
		対傾構	-	5.26	-		4.16
		横構	-	5.98	-		4.71
		桁端・支承	-	7.85	-		18.16
		全体	-	5.03	-		5.01
シナリオ2	経過期間	1.00	1.67	2.33	3.00	経過期間以外, 2回目と同様	
	塗膜劣化 面積率 (%)	一般部	3.32	6.20	2.65		6.11
		下フラン ジ・添接部	9.47	7.37	7.37		7.37
		対傾構	5.26	4.16	4.16		4.16
		横構	5.98	4.71	4.71		4.71
		桁端・支承	7.85	18.16	18.16		18.16
		全体	5.03	6.99	5.01		6.94
シナリオ3	経過期間	1.00	1.10	1.76	1.95	経過期間以外, 2回目と同様	
	塗膜劣化 面積率 (%)	一般部	3.32	3.70	2.65		3.57
		下フラン ジ・添接部	9.47	10.74	7.37		10.30
		対傾構	5.26	5.91	4.16		5.69
		横構	5.98	6.73	4.71		6.47
		桁端・支承	7.85	1.55	18.16		3.53
		全体	5.03	5.03	5.01		5.01

である。しかしながら、シナリオ2における初回全面塗替え時の一般部の劣化面積率は、表-6に示すように6.20%であり、初回部分塗替え時の桁端部・支承部の劣

化面積率18.16%に比べて低い値ではあるが、5%以上であることから見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる状態であり、実際は、部位によっては素地調整が困

難となることが予想される。

シナリオ1において全面塗替え回数が4回以下の少ない期間においては、シナリオ3がシナリオ1を上回る期間が存在し、供用期間が短期間で塗替え回数が少ない橋梁において、シナリオ3は非効率である。しかしながら、シナリオ1において全面塗替え回数が5回の時点で、シナリオ3の全面塗替え回数は4回であり、部分塗替えの効果で全面塗替え周期が延びたことによる全面塗替えの回数削減により、供用期間が長期間で塗替え回数が多い橋梁においては最終的には塗装のLCCおよびLCVOCともにシナリオ3がシナリオ1を下回る。

設定環境別でみると、側道隣接地におけるシナリオ3のLCCとLCVOCの部分塗替えによる低減効果が少ない。これは、側道隣接地における下フランジの劣化進行が他の立地環境に比べ早いため、シナリオ3における部分塗替え対象部ではない弱点部がさび比率で支配的となることが原因である。その他の設定環境ごとの差異は比較的軽微で、どの環境下においても全環境における結果と同等であり、シナリオ2または3で部分塗替えを行うことによってLCCおよびLCVOCが低減される。

3.3 素地調整の影響

3.2での算定においては、桁端部および支承に関して、ブラストによる素地調整が困難であるため電動工具による素地調整である3種ケレンを想定していたが、桁端部および支承についてもブラストによる1種ケレンが可能であるケースを考慮し、全部位が1種ケレンによる同一の素地調整程度と想定し、全環境を対象として算定を行った。なお、素地調整の変更に伴い、算定に用いる各シナリオの橋梁1m²当たりの費用とVOCは、表-7に示すように変更した。また、LCC算定結果を図-12に示す。

シナリオ2に関しては、部分塗替えを行うことによるLCCおよびLCVOCの低減がされているが、シナリオ3では部分塗替えによって全面塗替えを引き延ばす期間が短くなるため、LCCおよびLCVOCともにシナリオ1を上回る期間が塗替え回数を重ねても存在し、LCCおよびLCVOCで効果的とは言い難い。

3.4 塗替え履歴を考慮

松田らの「鋼橋塗装の実態調査(第二報)(1992)」⁷⁾⁸⁾において、一般塗装系であるA塗装系では、塗替えを重ねるに従い塗装周期が短くなるという報告がある。これは、塗替え塗装における素地調整が著しく劣化している場合を除いて3種ケレンで行われていたため、劣化が確認できない箇所については旧塗膜を残すこととなり、結果として塗膜下のさびを除去できず、新規塗装時の下塗り塗料の防食効果が薄れ、塗膜下腐食が進行するためと考えられる。「鋼橋塗膜の評価技術(その2. 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測)」¹⁰⁾において、相対比較例として新規塗装の塗装周期を10とした場合、塗替えご

表-7 全部位同一素地調整とした場合の単位費用と単位VOC

	費用(円)	VOC量(g)
全面塗替え	9813	284
部分塗替え	シナリオ2	5630
	シナリオ3	607

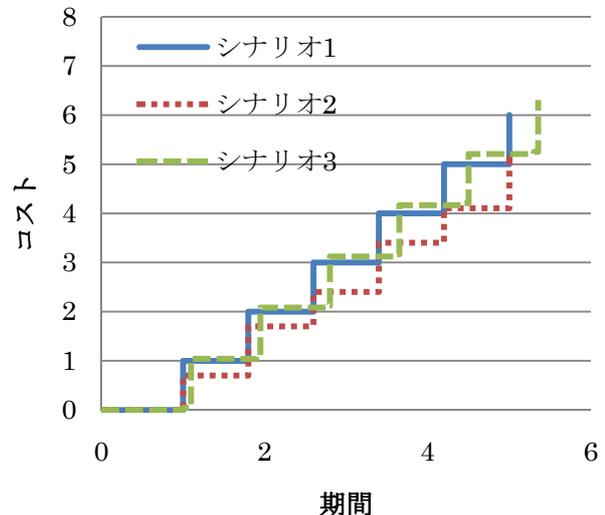


図-12 全部位同一素地調整とした場合のLCC経時変化

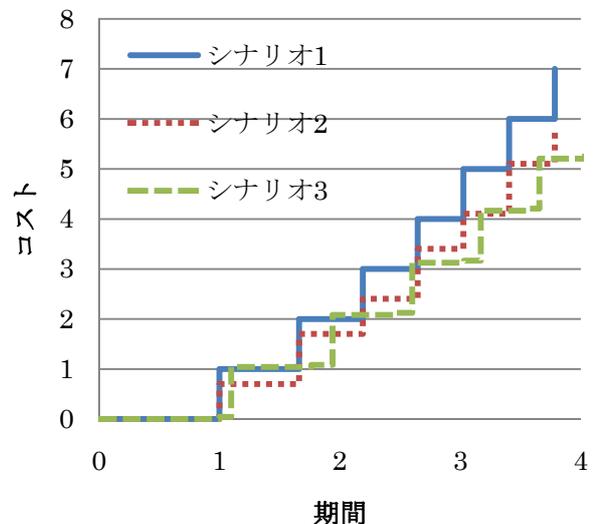


図-13 塗替え履歴を考慮した場合のLCCの経時変化

とに8→6→5→4と周期が短くなるとしている。部分塗装を行うとその部分だけ塗替え回数が多くなるため、部分塗装のLCC低減効果に影響を及ぼす可能性が考えられる。

A塗装系とは異なり、C塗装系では下塗り塗料にジンクリッチペイントを用いており格段に下塗り塗料の防食効果が向上している点や、1種ケレンによる素地調整を行っているため塗装履歴による影響は上記の比率ほど大きくないと考えられるが、塗替え施工が健全に行わ

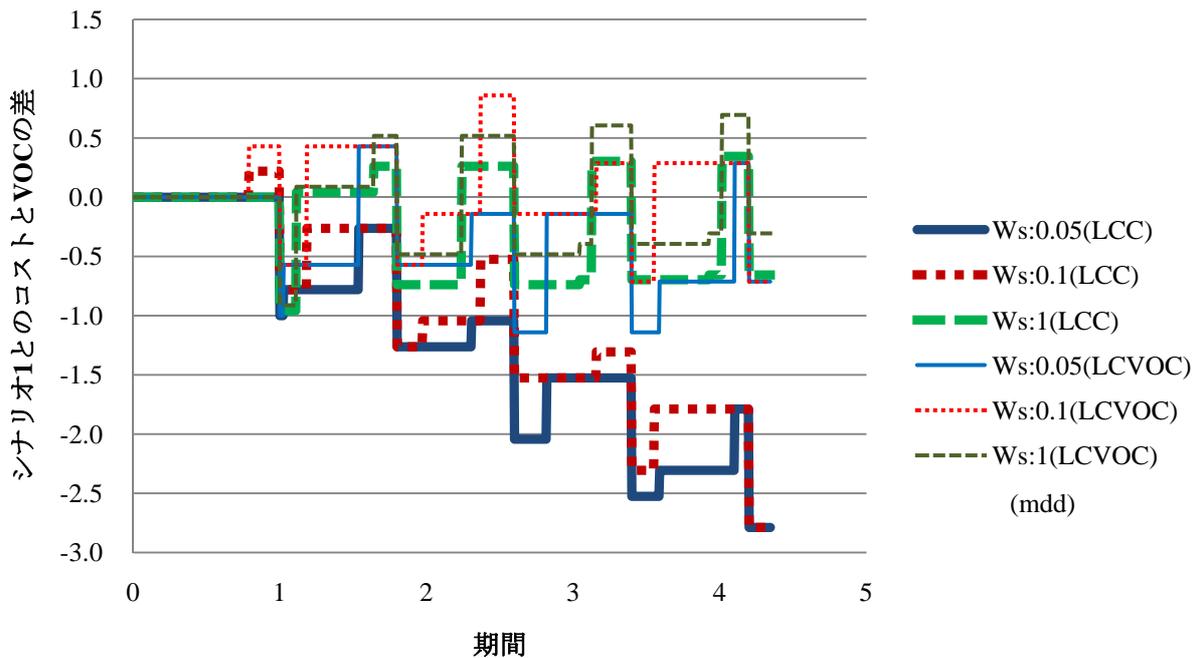


図-14 検査足場を利用した場合のLCCおよびLCVOCのシナリオ1との差

れたケースとの比較として、上記の比率を用い5回目以降は4回目と同期間の塗装寿命とし、全環境を対象として算定を行った。LCCの算定結果を図-13に示す。

塗装履歴を考慮した場合の部分塗替えのLCCおよびLCVOCへの効果として、シナリオ3においては全面塗替えの回数が少なくなるため、より低減効果が大きくなる。

3.5 検査足場の利用

鋼橋では、塗装健全度評価のための検査と疲労き裂の発見などの構造物耐力に関連した項目の検査が行われている。検査としては、2年を超えない範囲で目視検査が行われる通常全般検査と、別に定める期間ごと（事業者毎、構造物毎に異なるが概略8～10年程度が多い）に足場を用いて近接しての詳細な検査（特別全般検査）が実施されており³⁰、新幹線橋梁などでは8年ごとに特別検査が実施されている。今後、アセットマネジメントの普及に伴い、足場を用いた詳細検査の実施が増加することが予想される。この詳細検査における足場を防食塗装の足場と共有すれば、LCCの低減が飛躍的に図れる可能性がある。また、文献31)においても、部分塗替えを経済的に行う手法として、橋梁点検車の使用などによって足場の架設を別途行わずに塗装する方法が示されている。そこで、足場を用いる詳細検査が8年周期で実施されると想定し、シナリオ3の塗替え時期を検査時期に合致するように調整して足場の必要性の有無を考慮せずに弱点部全域に部分塗替えを行うとして、部分塗替えによるLCCおよびLCVOCの低減効果が少ない全部位同一素地調整のケースの算定を行った。シナリオ1とのコス

トとVOCの差の経時変化を図-14に示す。

全面塗替え周期よりも詳細検査の周期が短い（飛来塩分量 W_s :0.45mdd以下）のケースでは、部分塗替えを行うことによるLCCの低減効果が図-14より確認できる。また、部分塗替えの範囲が増えたことにより、全面塗替えの時期をより引き延ばすことができるため、LCVOCに関しても低減できるケースがある。しかしながら、飛来塩分量 W_s が0.1のケースのように、コスト面では良好なケースであっても、VOCの面では低減されているわけではない。これは、足場の共用はコスト面では効果的ではあるが、LCVOCの面では影響が非常に小さいためである。よって、LCVOCの削減を行う手法としては、部分塗替えも一定の効果が期待できるが、「鋼構造物塗装設計施工指針」³²⁾において採用された水系塗料のように、塗料自体の改良を行う手法がより効果的である。

4. 結論

本研究は、塗替え基準を全体平均塗膜劣化面積率が5%に達した時点として、鋼橋の塗装弱点部に着目し、その改善策である角部加工と部分塗替えのライフサイクルアナリシスを行った。その結果、以下のような主な結論が得られた。

- 1) 角部加工の評価方法として、単位長さあたりの腐食面積を提案し、角部加工を考慮したライフサイクルアナリシス手法を確立した。
- 2) 実橋梁を対象に角部加工を考慮し、塗装寿命を推定した結果、角部加工による塗装寿命の延命効果は、算定を行ったプレートガード橋梁では、無加工に

比べて約 1.1 倍であった。

- 3) 塗替え時期固定型の塗替え基準を採用している橋梁においては、弱点部全域の部分塗替えを活用することにより全てのケースにおいて LCC と LCVOC とともに低減できる。
- 4) シナリオ 3 で想定した塗替え時期変動型の塗替え基準を採用している橋梁においては、桁端や支承といった足場費用が小さい弱点部のみを部分塗替えし、全面塗替え時期を遅らせることにより、全面塗替え回数の削減ができ、全面塗替え回数が多い橋梁においては LCC および LCVOC とともに低減できる。
- 5) 全部位同一の素地調整を施すとした場合、部分塗替えによって全面塗替えを遅らせるシナリオにおいて LCC と LCVOC は全面塗替えのみのシナリオよりも上回る期間が長い。しかし、そのようなケースにおいても、飛来塩分量が少なく腐食劣化速度が遅い橋梁で詳細検査の足場を部分塗装にも用いると LCC は低減される。
- 6) 素地調整を 3 種ケレンで行うなどの影響により塗替え履歴によって塗装寿命が短くなっていくと想定した場合、部分塗替えによる LCC および LCVOC の低減効果は増大する。

謝辞

本研究を行うにあたり、資料提供などをいただきました。独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の林田宏氏には、深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 青野實：鋼構造物塗装の使命, *Structure Painting*, Vol.38, No.1, p.1, 2010.
- 2) 伊藤義人, 永田裕規, スヌワル ラスクマン, 西川和廣：地球環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.
- 3) Itoh, Y., Liu, C., Umeda, K. and Nishikawa, K.: Lifecycle assessment application for bridge technology development, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.7, pp.169-186, 2001.
- 4) 坪内佐織, 伊藤義人, 金仁泰, 守屋進：塗装に着目した鋼橋のライフサイクルアナリシス, *構造工学論文集*, Vol.52A, pp.1305-1315, 2006.
- 5) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋の長寿命化のための方策 (塗装からの取り組み), *JSSC テクニカルレポート No.57*, 2002.
- 6) 松田哲夫, 藤原博, 佐久間智：鋼橋塗装の実態調査, *鋼橋塗装*, Vol.18, No.4, pp.27-37, 1990.
- 7) 松田哲夫, 藤原博：鋼橋塗装の実態調査 (第二報) (上), *鋼橋塗装*, Vol.20, No.1, pp.36-40, 1992.
- 8) 松田哲夫, 藤原博：鋼橋塗装の実態調査 (第二報) (下), *鋼橋塗装*, Vol.20, No.3, pp.38-45, 1992.
- 9) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析, *土木学会論文集*, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 10) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 2002.
- 11) 林田宏, 田畑浩太郎, 宮本修司, 田口史雄：鋼橋塗装に対する早期劣化対策の効果に関する検討 - 追跡調査 2 年目の評価 -, *寒地土木研究所 月報*, No.676, 2009.
- 12) 田畑浩太郎, 林田宏, 宮本修司：北海道の鋼橋塗装における塗膜厚膜による早期劣化対策の効果検証, *土木学会第 65 回年次講演会概要集*, pp.821-822, 2010.
- 13) 清水善行, 伊藤義人, 金仁泰：角部形状が鋼橋防食性能に与える影響に関する基礎的研究, *構造工学論文集*, Vol.53A, pp.825-833, 2007.
- 14) 社団法人 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.
- 15) 林田宏, 田口史雄, 嶋田久俊, 住岡栄悦, 後田悟, 伊藤健一：重防食塗装系の鋼橋塗膜劣化調査と早期劣化対策の検討, *寒地土木研究所 月報*, No.652, 2007.
- 16) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術 (その 2. 塗膜劣化の経時変化モデルと寿命予測の検討), *JSSC テクニカルレポート No.45*, 1998.
- 17) 社団法人 鋼材倶楽部：橋梁の環境負荷評価試算例 社会資本整備とエコマテリアルに関する調査研究報告書, 1999.
- 18) 林田宏, 田口史雄, 嶋田久俊：鋼橋塗装の耐用年数及びライフサイクルコストに関する研究, *寒地土木研究所 月報*, No.629, 2005.
- 19) 伊藤義人, 坪内佐織, 金仁泰：環境促進実験による塗替え塗装鋼板の腐食劣化特性に関する研究, *構造工学論文集*, Vol.64, No.3, pp.556-570, 2008.
- 20) 藤原博, 三宅将：鋼橋塗膜の劣化度評価と寿命予測に関する研究, *土木学会論文集* No.696, pp.111-123, 2002.
- 21) 金仁泰, 伊藤義人, 肥田達久, 小山明久, 忽那幸浩：環境促進実験を用いた鋼橋塗装系の腐食劣化評価, *構造工学論文集*, Vol.52A, pp.803-812, 2006.
- 22) 伊藤義人, 金仁泰, 貝沼重信, 門田佳久：素地調整が異なる塗装鋼板の腐食劣化に関する基礎的研究, *土木学会論文集* No.766/I-68, pp.291-307, 2004.
- 23) 伊藤義人, 岩田厚司, 貝沼重信：鋼材の腐食耐久性のための促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究, *構造工学論文集*, Vol.48A, pp.1021-1029, 2002.
- 24) 金仁泰, 伊藤義人：円形素地露出部を持つ防食鋼板の腐食劣化評価に関する実験的研究, *構造工学論文集*, Vol.51A, pp.1069-1079, 2004.
- 25) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜の評価技術 (その 1. 塗膜劣化の判断基準の検討), *JSSC テクニカル*

- レポート No.31, 1995.
- 26)株式会社 関西ペイント：KHD システムガイドブック（橋梁塗装塗替え編），2002.
- 27)社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV 03-1993, 1993.
- 28)社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗替え塗装の品質向上のために, JSSC テクニカルレポート No.61, 2004.
- 29)西川和廣：道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 30)田中誠：社会資本の維持・防食技術 50 年の変遷—橋梁—, 防食管理, pp.602-611, 2007.
- 31)社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗装の LCC 低減のために, JSSC テクニカルレポート No.55, 2002.
- 32)財団法人 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針, 2005.

(2010 年 9 月 16 日受付)