

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

Research on the Service Life and Life-Cycle Cost of Steel Bridge Coatings

林田 宏* 田口 史雄** 嶋田 久俊***

Hiroshi HAYASHIDA, Fumio TAGUCHI, and Hisatoshi SHIMADA

本研究では、鋼橋塗装について、環境条件や塗装種別などの違いを考慮に入れた適切な塗り替えサイクルを検討することによりライフサイクルコストの縮減を図ることを目的として、各塗装系の経時的な劣化の傾向について、平成14年度に行った調査橋梁の調査データ及び防錆台帳のデータを基に、腐食環境、素地調整、塗替回数ごとに回帰による分析を行った。その結果、1) 塗替前の発錆量が多い場合、平面方向への広がりと共に深さ方向にも進み、素地調整が不十分になるため、早期に凹部や狭隘部に残存したさびから発錆が始まり、耐用年数が小さくなる。

2) 塗替えにおいて素地調整が3種の場合、旧塗膜の健全部に塗料を塗り重ねていくため、経年により旧塗膜の防錆性能が低下することなどにより耐用年数が小さくなる。

3) 回帰分析による各塗装系の塗膜耐用年数を用いてライフサイクルコストの試算を行った結果、塗替塗装の場合、一般塗装系に比べ重防食塗装系を用いることにより、ライフサイクルコストの低減が可能であることを解明した。

《キーワード：鋼橋塗装、素地調整、塗替回数、重防食塗装系、ライフサイクルコスト》

This research aims to reduce the life-cycle cost of coatings on steel bridges by determining the optimum recoating cycle for various environmental conditions and coating types. Toward this, time-lapse deterioration of different coating systems was analyzed. Based on data from a bridge survey performed in 2002 and on maintenance records of anticorrosive treatment, regression analyses were performed for different corrosive environments, surface treatments, and number of recoatings. The following were revealed.

- 1) The service life of the coating is shorter when there is substantial corrosion before recoating. This is because the corrosion has spread along the surface and deeper into the steel, making surface treatment inadequate and causing early rust-back from residual rust in depressed or narrow spaces.
- 2) In type-3 surface treatment, recoating is conducted after corroded coating is removed, but existing coating that is judged to be intact is left. However, the anticorrosion performance of the existing coating decreases over time. Therefore, leaving the existing coating shortens the service life.
- 3) Life-cycle cost was estimated from the service life of the coating film, according to the regression analysis for each coating system. It was found that the life-cycle cost of recoating could be reduced by using heavy-duty anticorrosive coating systems instead of general coating systems.

《Keywords : steel bridge coatings, surface treatment, number of recoatings, heavy-duty anticorrosive coating system, life-cycle cost》

1. はじめに

鋼橋塗装は、適切な維持管理により塗膜を健全に保持することで、長期間にわたり鋼材を腐食から保護し構造物としての機能を保つためのものである。

鋼橋塗装の塗替え時期については、維持管理を行っている機関ごとに規定や要領などを定め判断基準としているが、ライフサイクルコストを考慮し、適切な塗替え時期を客観的かつ定量的に評価・判定する方法は未だ十分には確立されていない。

本研究は、北海道開発局所管の鋼橋について塗膜劣化調査を行い、適切な塗装の塗り替えサイクルについて環境条件や塗装種別などの違いを考慮して検討を行い、鋼橋塗装に関する維持管理の効率化、ライフサイクルコストの縮減を図ることを目的としている。

積雪寒冷地に分類される北海道の地域特性に基づいた合理的な塗膜耐用年数を求めるため、平成14年度に実施した調査橋梁の現地調査データ及び防錆台帳データに基づき、各塗装系毎に回帰分析を実施し、それぞれの塗装系における一定のさび量に達するまでの年数を求めることなどから考察を試みることにした。

2. 研究概要

2-1 検討項目

鋼橋の塗膜劣化に影響を与える要因としては、海からの飛来塩分など腐食促進因子の多少により判断される「腐食環境」要因、素地調整に関する不十分さや劣化した塗装を健全な塗膜と判断して除去せずに塗料を塗り重ねるなど「素地調整」、「塗替回数」の要因などが考えられる。

本研究では、これらの塗膜劣化要因と各塗装系の経時的な劣化の傾向について回帰分析を行い、腐食環境別に一定のさび発生面積率に達するまでの年数を塗膜耐用年数として算出した。また、調査から得られた各塗装系の塗膜耐用年数を用いてライフサイクルコストの試算を行った。

2-2 使用データ

本研究では、平成14年度に行った調査橋梁の調査データ及び防錆台帳のデータを基に、最終塗装年月から調査年月までの経過年数とさび発生面積率を使用して行うこととした。また、取りまとめに当たっては以下の条件で整理した。

1) 高欄部、増桁部、鋼板接着、歩道橋のデータは除

外した。

2) B-2塗装系、b-2塗装系、g塗装系等については、現在の塗装便覧¹⁾の標準塗装系では規定されていない為、除外した。

3) 使用した塗装系のうち、塗替a塗装系は鉛系さび止め塗料+（超）長油性フタル酸樹脂塗料を使用している塗替a塗装系及び塗替a-1塗装系を総称するものとした。

2-3 塗膜耐用年数の考え方について

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 IV03-1993」²⁾のさび評価基準（表-1）では標準図をもとにした見かけさび面積による調査方法を用いて評価しており、本研究では発生面積0.3～5%を最適塗替え時期とした。ただし、標準図に示された発生面積は、塗膜上から確認できる見かけさび面積である。一方、防錆台帳では塗替工事を実施するにあたって適用すべき素地調整分類を決定する事を目的としているため、所要の補正を行い、内部さび面積を算出している（図-1）。

そこで、ドイツ工業規格 DIN53210を参考にして、見かけさび面積0.3～5%を内部さび面積に換算すると約1.6～7%となり、素地調整種別の3種C（5%未満）から3種B（5%以上15%未満）に該当する範囲となる。

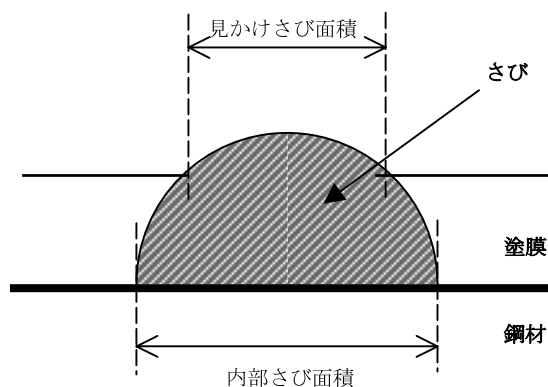
鋼橋塗膜の寿命については、劣化の要因が多数でその作用は複雑であり、寿命の判定基準が一律でない等の理由から塗膜寿命の一律的な判定は大変困難であるとされている³⁾が、本研究では、素地調整が3種B（5%以上15%未満）の下限值である5%に達した時点を塗替え時期として「塗膜耐用年数」と考えることとする。

2-4 回帰分析手法について

回帰の条件は、決定係数（ R^2 ）を指標として回帰式の精度の良否を判断した。回帰式の精度を判断する絶対的基準は無いが、一般的に決定係数（ R^2 ）=0.5～0.8程度であればおおむね良い精度であるとされている⁴⁾。しかし、各種条件により分類したデータに対し回帰分析を行った結果、決定係数（ R^2 ）が0.5未満となったため、回帰から得られた標準誤差を基準とし、残差が標準誤差を越えるデータは標準誤差内に収まっているデータとは素地調整に関する品質管理不足等の異なる要因があるものとして取り扱うこととし、データから除外して再度回帰分析を行いそのグループの回

表－１ 「鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV03-1993」のさび評価基準（（社）日本鋼構造協会）

評 価 点 (RN)	発 生 状 態	
	発生面積(%)	外 観 状 態
3	$X < 0.03$	異常なし。 誰が見ても外観的にはさびが認められないか、さびらしきものがあっても無視しうる程度のもの。
2	$0.03 \leq X < 0.3$	僅かにさびが見られる。 さびが観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると思われる状態。
1	$0.3 \leq X < 5.0$	明らかにさびが見られる。 誰が見ても発生の部分が多く、何らかの処置をほどこさなければならない状態。
0	$5.0 \leq X$	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。早急に塗料を塗り直さなければならない状態。



図－１ 見かけさび面積と内部さび面積

帰式を得ることとした。

なお、回帰分析に当たっては、過去の研究結果⁵⁾ から塗替え時期を判断する期間の範囲であれば、二次曲線によって劣化傾向が把握できるとされていることから、本研究では基本的に二次曲線によって回帰分析を行った。ただし、二次曲線が上手く当てはまらないケースにおいては、やむを得ず一次直線を用いて回帰分析を行った。

３．研究結果と考察

3-1 各塗装系の腐食環境別の塗膜耐用年数

北海道に架設されている橋梁のうち、新設塗装系 A-1・B-1・C-1、塗替塗装系 a・b-1・c-1 のさび量のデータを腐食環境（一般環境、やや厳しい環境、厳しい環境）ごとに回帰分析を行った。この分析結果に基づいて各塗装系の環境別の塗膜耐用年数を表－２に示す。また、各回帰分析結果については図

－２に示す。分析の結果、以下のようなことが、確認された。

①各塗装系別に塗膜耐用年数を比較すると、防錆性能に優れている塗装系ほど塗膜耐用年数が大きくなっていること。

耐用年数 大 ←────────→ 小
塗装系 C系 > B系 > A系

②同一塗装系で環境別に比較を行うと、新設 B-1 塗装系を除き、環境が厳しいほど耐用年数は小さくなること。

耐用年数 大 ←────────→ 小
環境 一般 > やや厳しい > 厳しい

また、例えば、塗替 a 塗装系や一般環境の新設 B-1 塗装系などでは10年を過ぎる頃から曲線の傾きが急になっている。このように、塗膜の劣化進行はある時期から速度を増し、さびの発生が多くなるものと推測される。このため、塗替塗装については劣化進行が急速に進行する前に行うことが望ましいが、やむを得ず、

表－２ 各塗装系の環境別の塗膜耐用年数

塗装系 耐用年数	腐食環境	新設 A－１	新設 B－１	新設 C－１	塗替 a	塗替 b－１	塗替 c－１
塗膜耐用年数	一 般	15.2 年	15.4 年	64.3 年	13.6 年	13.8 年	36.7 年
	やや厳しい	—	22.2 年	—	—	7.8 年	14.3 年
	厳しい	—	—	23.8 年	—	3.2 年	13.9 年

注１）太字は直線式の値を採用。

注２）新設 A－１のやや厳しい環境・厳しい環境、新設 B－１の厳しい環境、塗替 a のやや厳しい環境・厳しい環境はデータが存在しない、また、新設 C－１のやや厳しい環境は有意なデータ数ではなかった為、回帰による予測は行えなかった。

劣化進行が進んだ橋梁については、十分な塗膜の点検調査を実施し、劣化状態やさびの発生状態を的確に把握して適切な維持管理を行うことが必要であると考えられる。

また、C（c）塗装系は他の塗装系と比べて、塗膜耐用年数が大きくなっている。C（c）塗装系は下塗りの防錆性能が強く上塗りの耐候性もよく、海上などの厳しい腐食環境においても長時間防錆効果を維持することが認められている。現在の鋼道路橋塗装に一般的に適用される塗装系の中では最も防錆性能に優れている塗装系であることも塗膜耐用年数が大きくなっている理由の一つと考えられる。しかし、C塗装系は平成2年の鋼道路橋塗装便覧の改定で適用された塗装系であり、北海道で正式に適用されたのが平成4年からであるため、塗装実施から十分な（塗替が実施される程度）年数を経過したデータが無く、また塗替が必要とされるまで劣化したデータも少ない。すなわち現段階では劣化進行の初期にあるデータしか存在しておらず、そのデータを基に回帰分析を行っていることから塗膜耐用年数が大きくなっている可能性もある。従って、塗膜耐用年数の精度を上げていくためには、塗装経過年数が長期間に及び劣化が進行したデータが観測されるよう劣化データの収集を継続する必要がある。

3-2 素地調整別の塗膜耐用年数

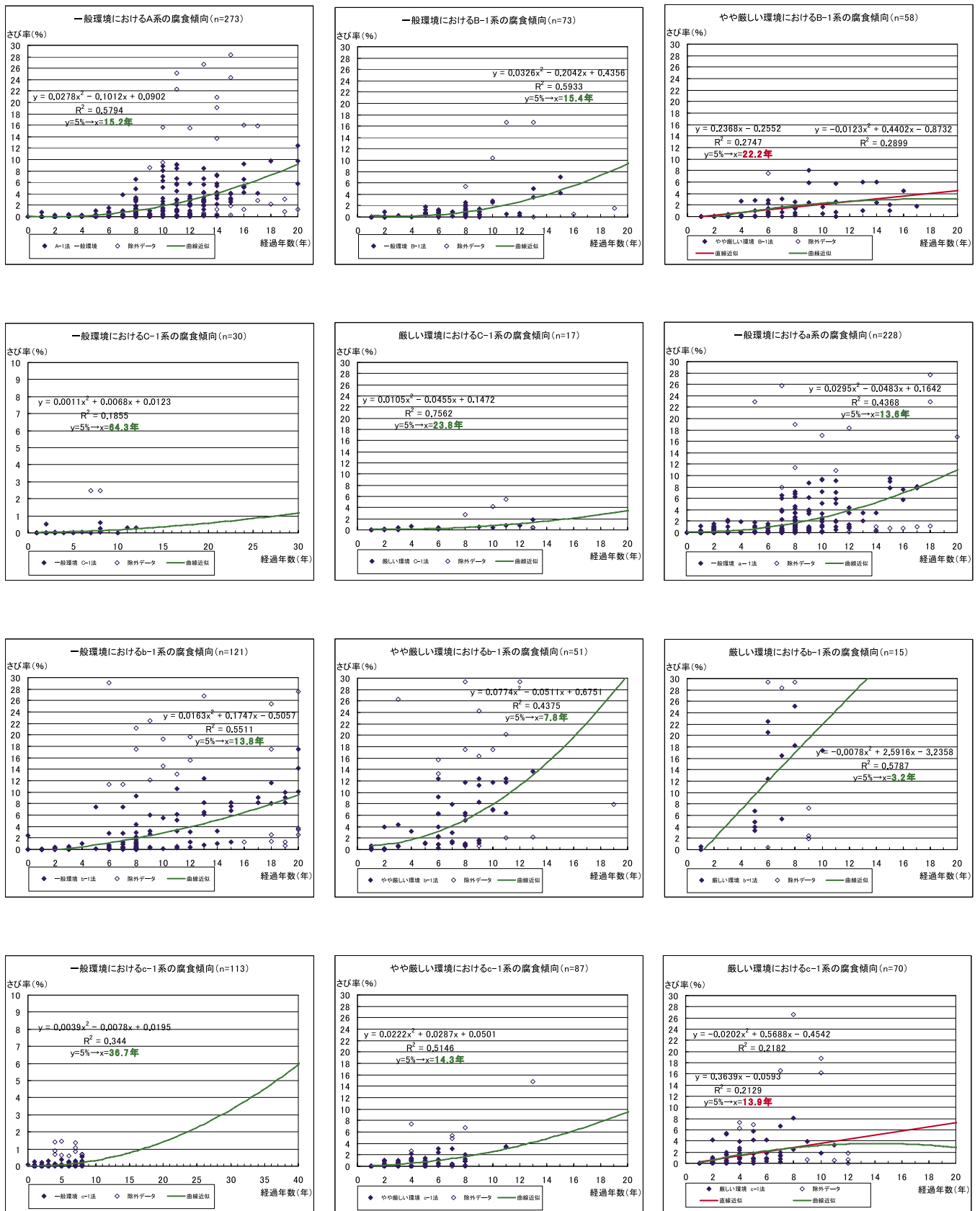
塗替の劣化発生の要因として素地調整や塗装系、塗膜厚等が関係しているが、その中でも素地調整の影響が約50%を占めるといわれている⁶⁾。ここでは一般環境における塗替 a 塗装系のデータを用いて素地調整種別（表－３）に回帰分析を行った。この分析結果に基

づいて素地調整種別が塗膜耐用年数に及ぼす影響について表－４に示す。また、各回帰分析結果については図－３に示す。

一般環境における塗替 a 塗装系の塗膜耐用年数は表－２より13.6年となっている。素地調整別でみた場合、この塗膜耐用年数に達している素地調整は２種、３種 Cのみとなっており、３種 A、Bの素地調整は塗膜耐用年数以下の値を示している。３種 A、Bの素地調整の塗装耐用年数が短くなる要因として以下のことが推測される。

塗膜の劣化の進行に伴ってさびが広範囲に発生し、平面方向に広がると共に深さ方向にも進み、孔食や塗膜下のさび成長につながることによって鋼材面の凹凸が大きくなる。このため、鋼材表面の凹部に発生したさびはディスクサンダー等の電動工具によって完全除去することは難しく、凹部や狭隘部にさびが残存することになり、その箇所からの早期発錆が始まるものと推測される。また、３種の素地調整では旧塗膜下にさびが発生していても、表面上は健全塗膜と差異がない場合、塗替塗装時には活膜として判断し、その上に塗料を塗り重ねるため、時間の経過と共に旧塗膜下のさびが成長して塗膜表面に発生し、早期の発錆につながるものと推測される。

一方、２種の素地調整では、全体的な発生面積は３種の素地調整に比べて大きいものの、旧塗膜、さびを除去し、鋼材面を露出させるため、旧塗膜下に発生しているさびも見落とすことなく、取り除くことができ、結果として、塗膜耐用年数を延ばすことができると推測される。



図ー 2 各塗装系の腐食環境別の回帰分析結果

表－3 素地調整種別の分類

①さびが発生している場合

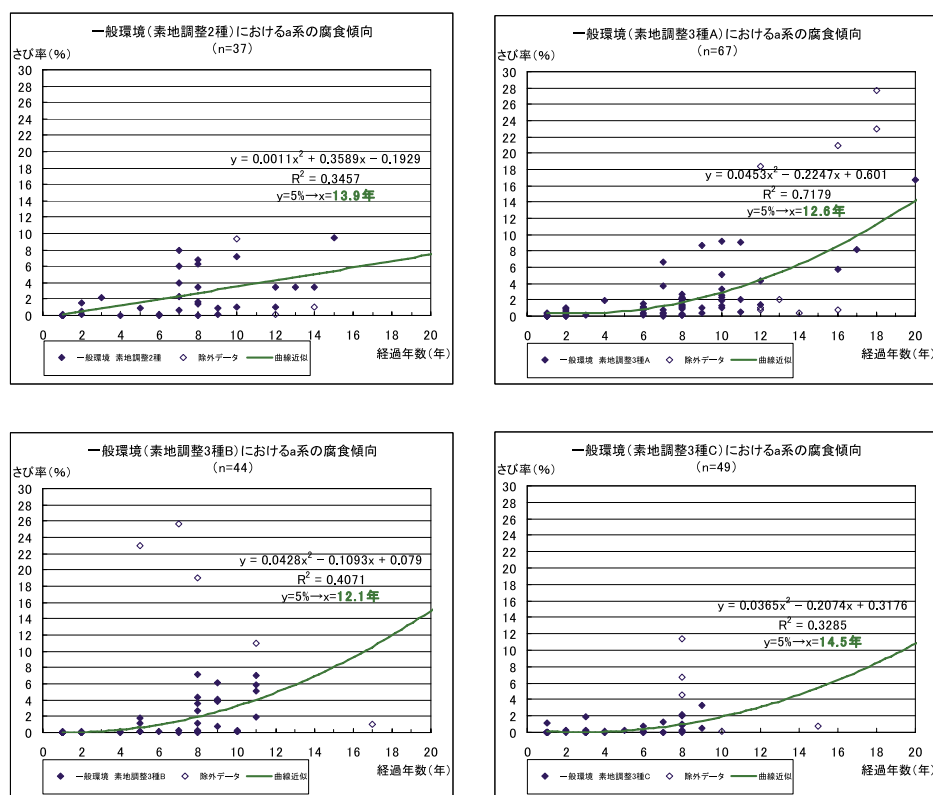
素地調整種別	さびの状態	発錆面積(%)	素地調整内容
2種	点錆が進行し、板状錆に近い状態や、こぶ状錆となっている。	30以上	旧塗膜、さびを除去し、鋼材面を露出させる。
3種A	点錆がかなり点在している。	15～30	活膜は残すが、それ以外の不良部(さび・われ・ふくれ)は除去する。
3種B	点錆が少し点在している。	5～15	同 上
3種C	点錆がほんの少し点在している。	5以下	同 上

②さびがなく、われ・ふくれ・はがれ・白亜化・変退色などの塗膜異常がある場合

素地調整種別	さびの状態	発錆面積(%)	素地調整内容
3種C	発錆はないが、われ・ふくれ・はがれの発生が多く認められる。	5以上	活膜は残すが、不良部は除去する。
4種	発錆はないが、われ・ふくれ・はがれの発生が少し認められる。	5以下	同 上
	白亜化・変退色の著しい場合。		粉化物・汚れなどを除去する。

表－4 一般環境における塗替a塗装系の素地調整別の塗膜耐用年数

素地調整種別	2種	3種A	3種B	3種C
耐用年数				
塗膜耐用年数	13.9年	12.6年	12.1年	14.5年



図－3 一般環境における塗替a塗装系の素地調整別の回帰分析結果

3-3 塗替回数別の塗膜耐用年数

3-2と同様に一般環境における塗替a塗装系のデータをを用いて塗替回数に着目して、回帰分析を行った。この分析結果に基づいて塗替回数が塗膜耐用年数に及ぼす影響について表-5に示す。また、各回帰分析結果については図-4に示す。

分析結果から、複数回の塗替を行った橋梁の塗膜耐用年数が短くなる傾向にある。この要因として以下のことが推測される。

3-2で前述した傾向と同様に、鋼材に発生したさびが横に広がると共に深さ方向にも進み、孔食や塗膜下のさびの成長につながることによって鋼材面の凹凸が増大し、凹部や狭隘部にさびが残存することによって、その箇所からの早期発錆が始まるものと推測される。

また、素地調整が3種の場合、旧塗膜上に塗料を塗り重ねていくが、塗替回数の増加に伴って過去に塗装されている塗膜の性能の低下が発生することが推測される。つまり30年前に架設された橋梁で素地調整が3種で塗替られてきた場合、最下層には30年前の塗膜が残存していることになり、旧塗膜の防錆性能の低下している影響もあると推測される。

3-4 ライフサイクルコスト（LCC）試算

本節では3-1の一般環境における各塗装系別の回帰分析から得られた塗膜耐用年数を基に、各塗装系のコストを試算しLCCの考察を行った。

3-4-1 試算条件

- LCC試算の条件は下記の通りとした。
- (1) 完成後100年間におけるLCCの算出を行った。
 - (2) コスト試算は腐食促進因子が少ないと考えられる一般環境での各塗装系を対象とした。
 - (3) 塗替モデルは、一般塗装系による塗替を継続する仕様とした、鋼道路橋塗装便覧「表-9.5 旧塗装系と同種の塗料を用いる塗替塗装系」に準拠し、A-1の塗替にはa-1を、B-1の塗替にはb-1を適用することとした。
 - (4) 各塗装系の塗膜耐用年数は3-1の回帰分析結果から算出することとし、さび発生率が5%程度に達する年数とした。また塗替時の素地調整種別は3種Bとした。

3-4-2 LCCの試算

以下に試算条件に基づき、LCCの試算を行った結果を表-6及び図-5に示す。

試算を行った結果、一般塗装系（A（a）塗装系）継続に比べ重防食塗装系（C（c）塗装系）継続は塗替回数で1/7、コスト比率にして約6割が低減される結果となった。これは、塗替え塗装では全体の費用に占める足場費用や素地調整に要する費用の比率が大きく、塗料に関わる費用は相対的に小さい為、耐久性の高い塗替仕様を適用することで、ライフサイクルコストを低減させることが可能であるためと考えられる。

表-5 一般環境における塗替a塗装系の塗替回数別の耐用年数

塗替回数	全体	1回	2回以上
耐用年数			
塗膜耐用年数	13.6年	14.3年	11.7年

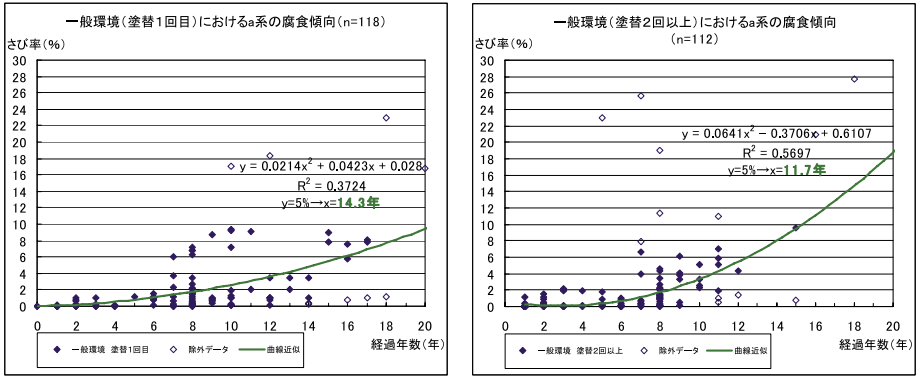
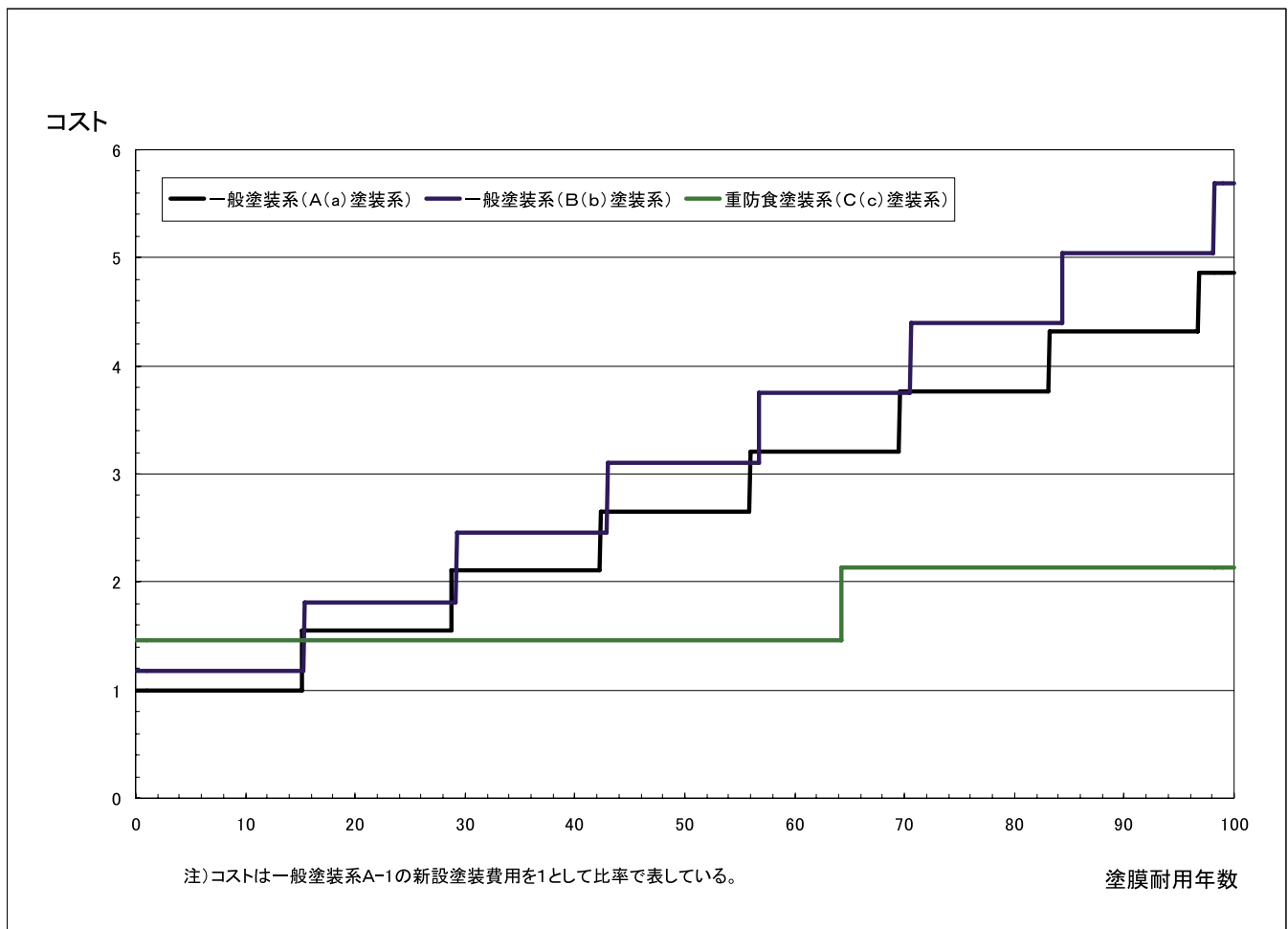


図-4 一般環境における塗替a塗装系の塗替回数別の回帰分析結果

表－6 塗替費及びL L Cの比較

	A(a)塗装系	B(b)塗装系	C(c)塗装系
新設塗装費〈A-1に対するコスト比率〉	1.00	1.17	1.46
残存供用年数の塗替え費〈a-1に対するコスト比率〉 (塗替回数)	1.00 (7回)	1.17 (7回)	0.17 (1回)
供用100年のLCC〈A-1(a-1)に対するコスト比率〉	1.00	1.17	0.44



図－5 一般環境におけるL C C比較

4. まとめ

(1) 素地調整別の塗膜耐用年数については、塗替塗装時の素地調整種別が3種A、Bの場合、塗膜耐用年数が短くなる傾向にあった。また、塗替回数別の塗膜耐用年数については、塗替回数が1回より複数回の橋梁の塗膜耐用年数が短くなる傾向が認められた。これらの理由として、以下のようなことが考えられる。

①塗替前の発錆量が多い場合、平面方向への広がりと共に深さ方向にも進み、素地調整が不十分になるため、凹部や狭隘部に残存したさびから早期に発錆が始ま

り、耐用年数が短くなる。

②塗替えにおいて素地調整が3種の場合、旧塗膜の上に塗料を塗り重ねていくため、経年により旧塗膜の防錆性能が低下することなどにより耐用年数が短くなる。

したがって、塗膜耐用年数を延ばし塗替サイクルを延長するためには、さびが深さ方向に進行する前の段階で塗替を実施し、鋼材面の凹部や狭隘部のさびを完全に除去する素地調整方法を適用することが必要と判断される。

(2) 回帰分析から得られた塗膜耐用年数を基に100年

間のLCCについて試算を行った結果、一般塗装系(A (a) 塗装系) 継続に比べ重防食塗装系(C (c) 塗装系) 継続は塗替回数で1/7、コスト比率にして約6割が低減される結果となった。これは、塗替え塗装では全体の費用に占める足場費用や素地調整に要する費用の比率が大きく、塗料に関わる費用は相対的に小さい為、耐久性の高い塗替仕様を適用することで、ライフサイクルコストを低減させることが可能となるためと考えられる。ただし、C (c) 塗装系のデータについては現段階では劣化進行の初期にあるデータしか存在しておらず、そのデータを基に回帰分析を行ったため塗膜耐用年数が大きくなっている可能性もあることから、塗膜耐用年数の精度を上げていくためには、今後も継続的に劣化データの収集を行う必要がある。

参考文献

- 1) 鋼道路橋塗装便覧、社団法人日本道路協会(平成2年6月)
- 2) 鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV03-1993、社団法人日本鋼構造協会(平成5年9月)
- 3) 吉田豊彦: 塗膜の寿命(I)、色材、Vol 65、No.5、pp.308-316、1992
- 4) 涌井良幸・涌井貞美: 図解で解る回帰分析、pp67、2002
- 5) 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、2002.1
- 6) わかりやすい塗装のはなし 塗る、関西鋼構造物塗装研究会、pp.106、(平成13年3月)



林田 宏*
Hiroshi HAYASHIDA

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員



田口 史雄**
Fumio TAGUCHI

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
室長
技術士(建設)



嶋田 久俊***
Hisatoshi SHIMADA

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
副室長