

V-1-1 鋼橋塗替え塗装の高度化に関する研究（1）

研究予算：運営費交付金（一般勘定、道路整備勘定）

研究期間：平成13年度～17年度

担当チーム：技術推進本部（先端技術）

研究担当者：山元 弘、石松 豊、河北憲治

【要旨】

鋼橋は、塗装等によって耐久性を確保している社会資本であり、鋼構造を腐食から保護している塗膜を良好な状態に保つため、ある期間経過した後、適切な塗替え塗装が施される必要がある。塗膜の耐久性は、塗料の防食性能と素地品質によって決まる。特に、既設鋼橋の塗替え塗装では、素地調整（下地処理ともいう）の影響が大きと言われており、本課題は、鋼橋の塗替え塗装における素地調整技術の研究を行うものである。

鋼橋塗替え塗装間隔の延長による維持管理の効率化のため、実態調査により問題点を整理し、塗替え時の塗料として塗膜の耐久性向上および環境問題に配慮した重防食塗装系（ふっ素樹脂塗料）を適用する場合における、適切な素地調整について検討した。ここでは、塗膜劣化に大きく影響する付着塩分量に着目し、その許容値および許容値以下となる素地調整の施工法について検討を行った。また、同施工法を適用した場合のLCC（ライフサイクルコスト）を求めて従来工法との比較も行ったのでここに報告する。

キーワード：鋼橋、塗装、素地調整、付着塩分

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは、その増加に伴い、維持管理の合理化や長寿命化が求められている。鋼橋等の鋼構造物は、塗装等の防食処理によって耐久性を確保している社会資本である。そのため、既設鋼橋は、塗替え塗装の品質向上により維持管理の合理化や長寿命化を図る必要がある。塗料に関しては、重防食塗料等の新しい高耐久性塗料が盛んに開発されているが、塗膜の耐久性を大きく左右するといわれる塗替え塗装時の鋼材上の素地調整については、品質確保のための方策が明らかになっていない。そのため、塗替え塗装における塗膜は、塗料の性能から期待できる耐久性を十分に発揮できていないといわれている。

そこで、塗替え塗装における鋼材上の適切な素地状態を定量的に示し、品質を確保できる素地調整の施工法を確立するため、表-1のような年次計画を立てて調査・検討を実施した。

表-1 年次計画

項目	年度				
	13	14	15	16	17
素地調整に関する技術開発の課題整理	○	○			
素地品質が塗膜耐久性に及ぼす影響の解明		○	○	○	
適切な素地品質を確保する素地調整手法の検証			○	○	○

2. 実態調査

2.1 道路橋の実態

平成10年4月現在、国・公団・地方自治体が管理する橋梁で、橋長15m以上の道路橋は13.6万橋を超えており、そのうち40%が鋼橋である¹⁾。橋梁延長でいうと、約49%が鋼橋である(図-1)。鋼橋の件数は、1970年代に急激に伸びており「団塊世代」を形成している²⁾。今後これら「団塊世代」の鋼橋が老朽化して行くため、維持管理の合理化や延命化のための技術の開発が必要となってきた。

2.2 塗替え塗装の実態

一般国道（指定区間）に設置されている橋梁件数9,732件¹⁾のうち、7,218件を対象として実態調査を

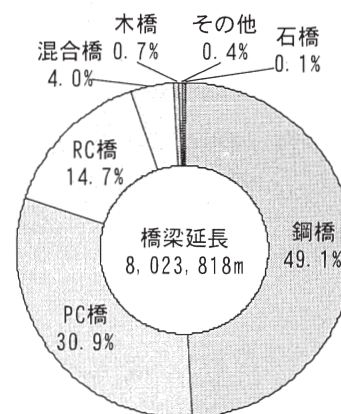


図-1 橋種別橋梁延長比率

行った。鋼橋に適用されている塗装系のうち、塗布作業の容易なA塗装系が74.5%と最も多いが、海岸に近づくにしたがって、A塗装系（長油性フタル酸系塗料）よりもB（塩化ゴム系塗料）、C塗装系（ふっ素樹脂系塗料）の適用実績の方が多くなっている。しかし、飛来塩分の影響が最も懸念される地域においても、C塗装系の適用は20%以下である。

維持管理では、塗装の塗替え補修が繰り返される。そのときの素地調整の種類は、塗膜の劣化程度に応じて選定されるものの³⁾、ほとんどが3種（付着物の除去および動力工具による劣化塗膜部の鋼材面露出）または4種ケレン（付着物の除去のみ）であり、活膜は残される。鋼橋の塗替え補修周期について調査したところ、図-2のように塗替え補修を繰り返すごとに塗替え周期が短くなっており、素地品質の影響が指摘されている⁴⁾。

2.3 塗替え塗装の動向

国土交通省では、グリーン購入法に対応して下塗り塗料を鉛・クロムフリーとする基本方針を、平成14年度に打ち出した^{5,6)}。そのため、鉛・クロムフリーさび止め塗料の開発が進められ、平成15年11月にはJIS化されている。

一方、平成17年12月発行の鋼道路橋塗装・防食便覧⁷⁾（以下「塗装防食便覧」と略す）では、『既にA, a塗装系が塗装されていて十分な防食性能を有している場合、および20年以内に架け替えが予定されている場合等には、塗料中に鉛やクロム等の有害重金属を含有しないA, a塗装系を適用することも可能である』としており、A, a塗装系の適用を推奨していない（塗装系の小文字表記は塗替え塗装を示す³⁾）。また、B, b塗装系についても、『塩化ゴム系塗料の製造時に国際的に規制されている四塩化炭素を使用する場合があることや、塗装系として防食性能が十分でないことおよび、塗替え塗装に問題があること』等により、便覧上で取り扱っていない。塗装防食便覧では、その優れた耐久性によるLCC縮減および環境配慮の観

点から、防食下地にジンクリッチペイント、下塗りにエポキシ樹脂塗料、上塗りにふっ素樹脂塗料を用いた重防食塗装系（C-5 塗装系、Rc-I 塗装系、「R」および小文字表記は塗替え塗装を示し、Iは1種ケレンを示す）を基本としている。この塗装防食便覧では、塗替え塗装において初めて1種ケレンを指定している。

3. 研究の方向性

3.1 対象とする素地調整の種類

塗装防食便覧にもあるように、耐久性向上によるLCC縮減および環境配慮の観点から、塗替え塗装においてもふっ素樹脂塗料を使用したRc-I塗装系の適用が主流となると考えられる。したがって、3種ケレン後の鉛・クロムフリーさび止め塗料および長油性フタル酸樹脂塗料による塗替え塗装であるRa-III塗装系を前提として素地調整の品質に関して検討を進めるのは得策ではないと考えた。

そこで本研究では、塗装防食便覧でいうRc-I塗装系での塗替え塗装における、1種ケレンによる素地調整に焦点をあてて、素地品質の確保や素地調整の施工法の確立へ向けての検討を行うこととした。

3.2 素地調整における品質管理項目について

鋼橋塗装において、素地調整の品質が塗膜劣化に大きく影響することは周知のこととなっている。素地調整は、ブラスト処理等によって鋼材表面に残存するさび、劣化塗膜等の介在物を除去するとともに、鋼材表面を清浄で且つ適度に粗にする作業である³⁾。また、水やスチーム等による洗浄も行い、付着塩分を十分に除去する場合もある。

素地調整の品質管理のためには、さびや劣化塗膜および付着塩分の適切な除去程度についての評価手法が必要である。ブラストによる素地調整の程度については、SISやISO等において、新設および塗替えの場合の表面の除せい（錆）度（Sa2^{1/2}、Sa3等）が見本帳等とともに示されている^{8,9)}。塗装防食便覧において、新設の場合の除せい度はSa2^{1/2}と明確に定められてい

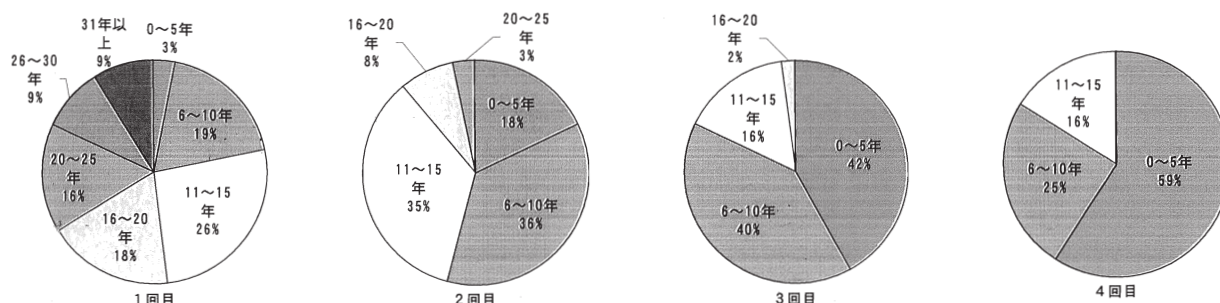


図-2 塗装補修履歴

るが、塗替え塗装においては、Rc-I 塗装系でケレン1種と指定されているだけで、除せいでについては示されていない。よって、Rc-I 塗装系における適切な除せいでについての検討が必要である。

付着塩分に関しては、平成2年6月発行の鋼道路橋塗装便覧³⁾（以下「塗装便覧」と略す）では『その許容量は NaCl 100mg/m² が多い』としている。また、塗装防食便覧では『水洗等により塩分が 50mg/m² 以下になるまで除去することが望ましい』している。ただし、これらの値は塗膜上の付着塩分の許容量であって、鋼材素地上の許容付着塩分量については触れられていない。現場において、ブラストを行う場合は、塗膜とともに付着塩分も除去できるため、水洗いは不要との声も聞かれており、塗装防食便覧において1種ケレン後の付着塩分量について触れられていないのも同様の理由のようである。動力工具の場合の付着塩分の除去効果については、塗装便覧に測定例が示されているが、

表-2 付着塩分量 (NaCl mg/m²) 測定結果

地域	採取場所	NaCl mg/m ²
都市部	主桁下フランジ下面	4,000~5,000
山間部	主桁下フランジ下面	25,000~35,000
海浜部	主桁下フランジ下面	40,000~50,000

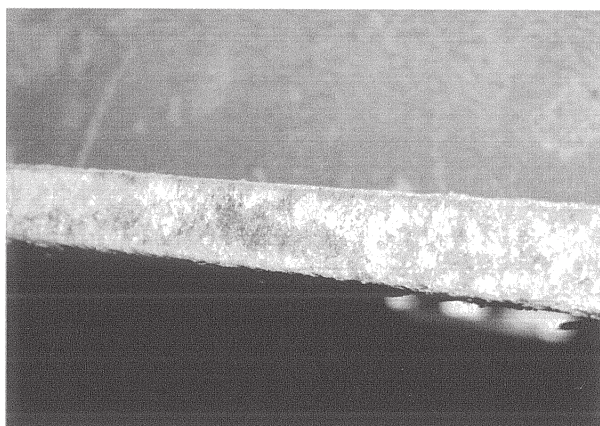


写真-1 海浜部主桁下フランジ下面 錆採取前

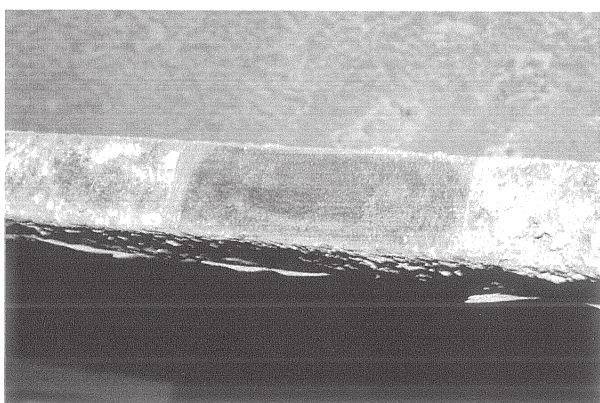


写真-2 海浜部主桁下フランジ下面 錆採取後

ブラストによる除去効果については示されていない。よって、ブラストによる付着塩分の除去効果および許容量についての検討が必要である。

4. 素地調整と付着塩分について

4.1 付着塩分量の実態調査

現況の鋼橋において、付着塩分量の実態を調査した。付着塩分採取については、都市部（凍結防止剤が散布されていない地域かつ人口100万人以上の都市）、山間部（凍結防止剤が散布されている地域）、海浜部（感潮区間地域）の3地域に分けて採取した。これは、都市部では大気環境、山間部では凍結防止剤 (NaCl) の影響、海浜部では海風による塩の影響を考慮したものである。なお、採取部分は最も腐食の著しい主桁下フランジ下面とした（写真-1、写真-2）。調査結果を表-2に示す。

4.2 付着塩分量測定方法

塗装防食便覧には、付着塩分の測定方法として、

- ① 電導度法
- ② ガーゼ拭き取り塩素イオン検知管法
- ③ プレッセル法（測定は塩素イオン検知管）

が示されているが、いずれも塗膜上の測定を想定しており、腐食が進行した凸凹している素地を正確に測定するのは困難である。また、塩素イオン検知管での測定は、精度が十分でない可能性があった。そこで、5%硫酸溶液で素地上の塩分を溶解させた後、塩分を抽出、濾過したものを JIS K 0101 の吸光光度法により塩素イオンを測定し、塩分 (NaCl) 量に換算することにより付着塩分量を求める方法を採用した。

4.3 ブラストによる付着塩分の除去効果

ブラストによる付着塩分の除去効果を確認するため、一般的なブラスト処理 (ISO Sa2^{1/2}、以下 Sa2^{1/2}) の前後および常温での高圧水洗浄 (表-3) の有無で付着塩分量を測定し比較した。試料として (H)150mm×(W)70mm×(t)3.2mm (材質 SS400) の短冊試験片を作成し、塩分付着は JIS K 5600-7-1 に基づき塩水噴霧により行った。噴霧時間は 50 時間と 300 時間の 2 種類とした。試料は A-1 塗装系で塗装したものと、無塗

表-3 試験片の洗浄方法 (常温)

	設定時	参考文献 ¹⁰⁾
水圧	7.5MPa	6~8MPa
ノズルから洗浄面までの距離	約 0.8m	1m
水量	3.5L/m ²	3.5~4L/m ²
洗浄回数	1回	2回以上

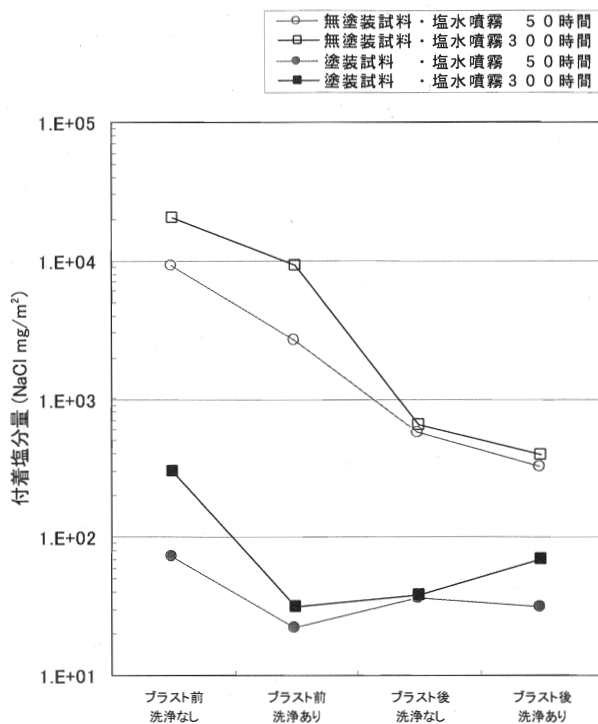


図-3 付着塩分量の変化

装 (ISO Sa3、以下 Sa3) のものを作成した。

試験結果を図-3に示す。塗装をしたものについては、試料塗膜が健全であったため、洗浄やブラスト処理により塩分が容易に除去できているが、無塗装のものは全面腐食しており、ブラスト後も高い付着塩分量が測定された。

実際の鋼橋では、塗膜劣化や鋼材腐食が著しい部位で付着塩分が多いことが予想され、同部位では通常のブラスト処理、洗浄を行っても十分に付着塩分を除去できず、塗膜の耐久性に影響を与える可能性があることがわかった。

5. ふっ素樹脂塗装のための素地上の付着塩分に対する塗膜劣化の許容付着塩分量の解明

塗膜上の許容付着塩分量は塗装便覧では『一般に NaCl 100mg/m² 以下としている場合が多い』、塗装防食便覧では『水洗等により塩分が 50mg/m² 以下になるまで除去することが望ましい』としている。しかし鋼材素地上での許容量については、現在のところ明確な基準はない。ここでは、今後よく適用されるであろう、ふっ素樹脂塗装 (Rc-I 塗装系) についての鋼材素地上の許容付着塩分量を解明するため、以下のような実験をおこなった。

表-4 ふっ素樹脂塗料系

塗料名	塗膜厚
有機ジンクリッチペイント	75 μm
弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	60 μm
弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料	60 μm
弱溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗り	30 μm
弱溶剤ふっ素樹脂塗料用上塗り	25 μm
合計	250 μm

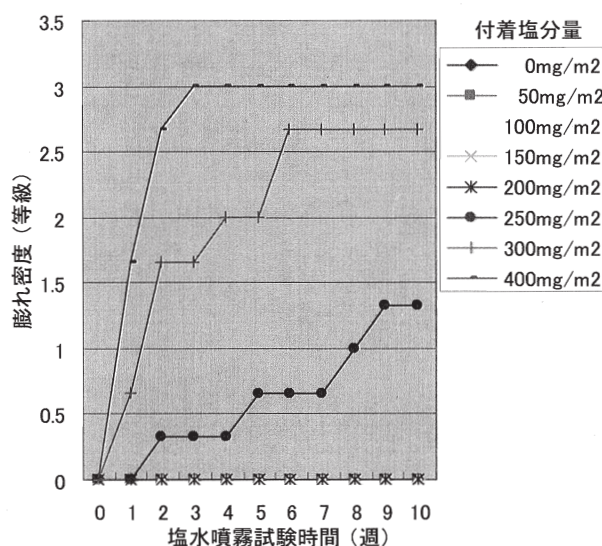


図-4 ふっ素樹脂の付着塩分量と膨れ密度の関係

まず、寸法 (H)150mm × (W)70mm × (t)3.2mm (材質 SS400) の試験片の片面をブラストにより Sa3 に処理した。素地上の許容付着塩分量はオーダ的に言って、塗膜上の許容付着塩分量の近傍にあると考え、作成した試験片に NaCl 溶液をハケにより塗布し、付着塩分量がそれぞれ 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400mg/m² になるように付着させ、これを各 3 枚作成した。これを表-4のように塗装し、塗装面に約 3cm の鋼面に達する傷 (クロスカット) をつけて、JIS K 5600-7-1 の塩水噴霧試験を実施した。塩水噴霧試験による塗膜劣化は JIS K 5600-8-2 の膨れの等級により評価した。

実験結果を図-4に示す。付着塩分量 250mg/m² 以上で膨れの現象が現れており、250mg/m² 以上は許容できないことが判明した。よって、許容付着塩分量は 200mg/m² 程度以下と推察される。

6. 塗替え時の素地調整品質確保の試験

6.1 複合サイクルによる促進試験

現況の鋼橋において、通常の洗浄やプラスト処理を施しても素地上の付着塩分の除去が不十分となる可能性があり、適切な素地調整について検討が必要であることがわかったが、そのためには曝露試験による試験片の作成が必要となる。しかし、曝露試験では時間がかかり過ぎるため、曝露に近いとされている複合サイクル試験 (JIS K 5621 の 7.12) で、促進試験をすることとした。図-5 に複合サイクル試験の設定条件を示す。付着塩分量と複合サイクル試験日数との相関を明らかにすれば、実態に近い付着塩分量となる試験片を作成するための複合サイクル試験の日数を求めることができる。

そこで、付着塩分量と複合サイクル試験日数との相関を求める試験を実施した。試験片は、寸法(H)150mm×(W)70mm×(t)3.2mm (材質 SS400) とし、A-1 塗装系で塗装し、図-6 のように塗装面の上半面の中央部に約 4cm の鋼面に達する傷 (クロスカット) をつけ、下半面に 10mm×20mm の非塗装部を設けた。試験日数は 100 日とし、データは 2, 3, 12, 17 日目および 5 日毎に採取して吸光光度法分析により非塗装部の塩分を測定した。

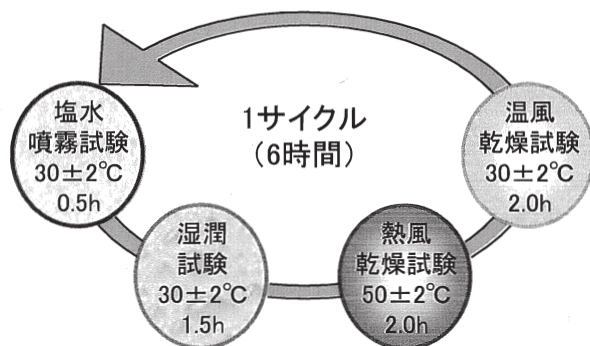


図-5 複合サイクル試験 (JIS K 5621)

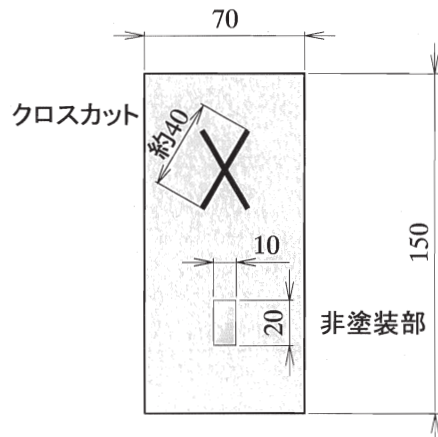


図-6 試験片

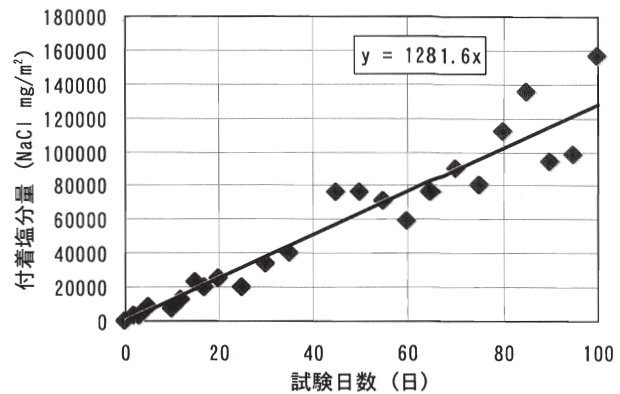


図-7 付着塩分量と試験日数との関係

図-7 に試験結果を示す。付着塩分量と曝露試験日数との関係はデータ点群より直線近似式が妥当であると考えた。試験日数 0 日するとき NaCl mg/m² も 0mg/m² とし、次式が導き出した。

$$y = 1.28 \times 10^3 \cdot x$$

y : 付着塩分量 (NaCl mg/m²)

x : 複合サイクル試験日数 (日)

これにより、実態の付着塩分量を上式に代入することにより、必要な複合サイクル試験の日数を求めることができ、実態の鋼橋の状態に合った近似的な試験片を作成することができる。

6.2 各影響因子による素地調整技術の実験

素地調整技術における各種影響因子についての検証を行うため、表-2 の都市部・山間部・海浜部の状態に相当する試験片をそれぞれ作成し検証試験を実施した。試験片は無塗装で、除せい度は Sa3 である。

検証する影響因子はプラスト材、洗浄水温度、洗浄圧力とした。図-8 にプラスト (洗浄) 条件を、表-5 に各影響因子のパラメータを示す。素地調整のプラ

表-5 各影響因子のパラメータ

	パラメータ
プラスト材	無し, サンド, アルマダイトガーネット, スポンジ
洗浄水温度	常温(約 10°C), 温水(約 60°C), スチーム
洗浄圧力	7.5MPa, 15MPa

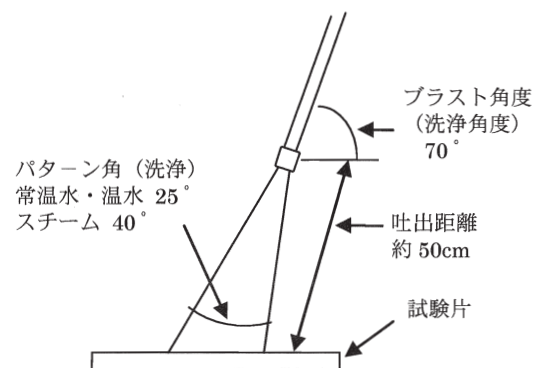


図-8 プラスト (洗浄) 条件 (Sa3)

ストの除せい度は Sa2^{1/2} である。また、1 回の洗浄水量は約 3.7L/m² とした。

ブラスト材をパラメータとしたときの結果を図-9 に示す。洗浄水温度、洗浄圧力にかかわらず、ブラスト材による違いはほとんど見られなかった。

洗浄温度をパラメータとした時の結果を図-10 に示す。ブラスト材、洗浄圧力にかかわらず、洗浄温度が高いほど付着塩分除去の効果が大きいことがわかった。

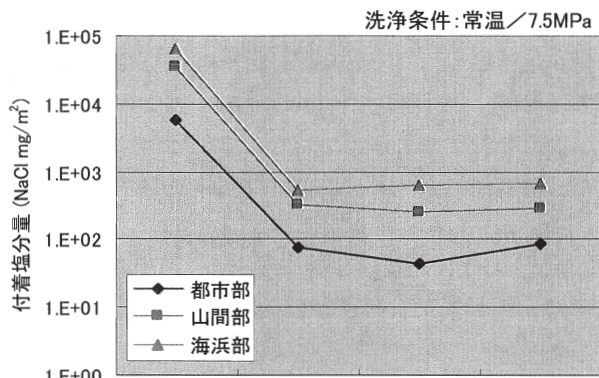


図-9 ブラスト材の影響

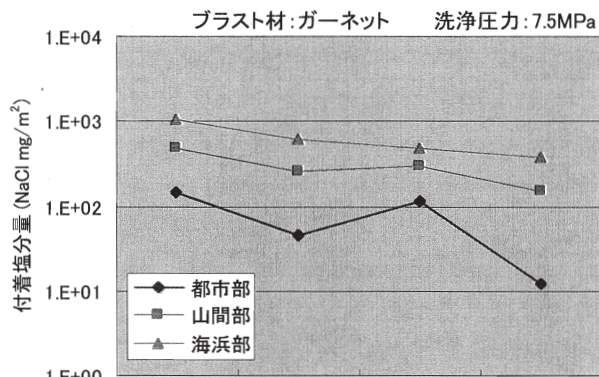


図-10 洗浄温度の影響

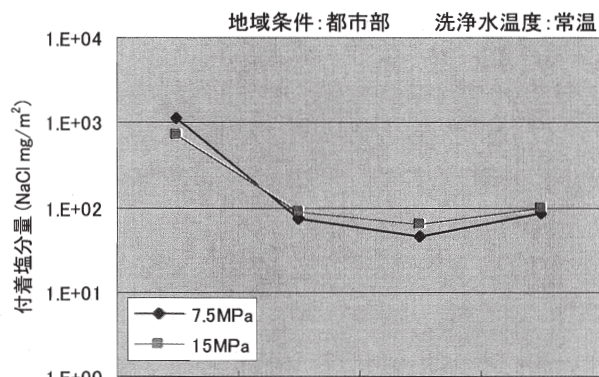


図-11 洗浄圧力の影響

洗浄圧力をパラメータとした時の結果を図-11 に示す。ブラスト材、洗浄水温度にかかわらず、洗浄圧力による違いはほとんど見られなかった。

また、洗浄回数（洗浄水量）の影響を見るため、複合サイクル試験にて海浜部相当の状態にした試験片を作成し検証試験を実施した。1 回の洗浄水量は約 3.7L/m² とした。

図-12 に Sa2^{1/2} のブラスト処理をして洗浄した結果を示す。洗浄回数の効果やスチームの効果が若干見られるものの、ふっ素樹脂塗料の素地として適正と思われる付着塩分量 200mg/m² 以下にはならなかった。

図-13 に Sa3 のブラスト処理をして洗浄した結果を示す。常温洗浄で 2 回より 1 回の方が値が小さくなっているが、どの結果もほぼ 200mg/m² 程度以下である。

以上より、ブラスト仕上げ等級を Sa3 として洗浄を実施すれば、ふっ素樹脂塗料の素地として適正と思われる付着塩分量 200mg/m² 以下の条件をほぼ満足できるといえる。洗浄はスチームによって行うことが望ましいが、この場合の洗浄水温度の影響は小さいと考える。

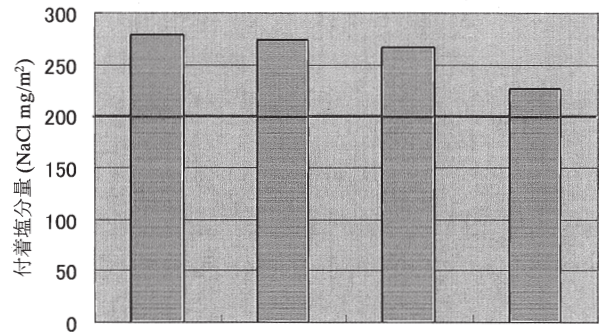


図-12 素地調整後の付着塩分量 (Sa2^{1/2})

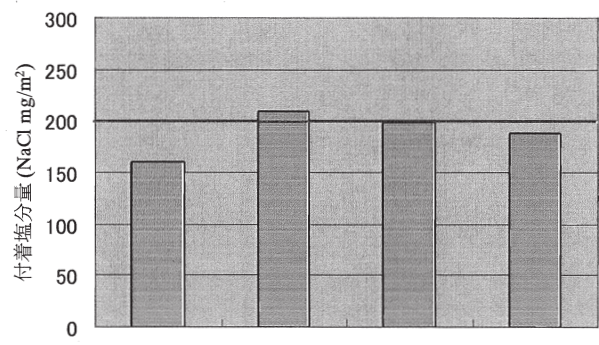


図-13 素地調整後の付着塩分量 (Sa3)

7. Rc-I 塗装系での塗替え塗装の LCC 試算

従来の一般環境仕様である A, a 塗装系と、今後採用が増えていくであろう重防食仕様の Rc 塗装系（初期塗替え Rc-I、それ以後の塗替え Rc-IV）について、塗替え塗装およびそれ以後の LCC（累計塗装費用）を試算し、比較を行った。重防食仕様では一般環境適用の場合（CASE-1）と厳しい環境適用の場合（CASE-2）で塗替え周期を変えて2ケース、一般環境仕様では塗替え周期を実績調査結果に合わせて変化させた場合（CASE-3）と一定の周期とした場合（CASE-4）の2ケースの計4ケースについて試算した。実際の算出条件ではもっと大きな幅があると考えるが、概ねの傾向を見るための試算である。その他の算出条件は表-6, 7に示す。

社会的割引率を一般的な4%とした場合と、0%とした場合で、100年間の各ケースのLCCを試算した結果を図-14, 15に示す。

割引率を4%とした場合、一般環境仕様で実績調査と同様に塗替え周期が次第に短くなっていくCASE-3では、塗替え塗装後30年前後で重防食仕様の方が安価となるが、10年周期を続けられると仮定したCASE-4では、100年経っても一般環境仕様の方が安価となった。

一方、割引率を0%とした場合は、CASE-4の場合でも30年程度で重防食仕様の方が安価となった。

表-6 検討ケース

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
仕様	重防食仕様 (C系：ふっ素)		一般環境仕様 (A系：フタル酸)	
	一般環境		厳しい環境	
塗替え周期 (年)				
初期塗替え	(17.2)	—	(17.2)	
塗替え後1回目	40	27	9.5	10
2回目			6.5	
3回目以降			5.9	
費用 (円/m ²)				
初期塗替え	13,277	13,277	4,742	4,742
塗替え後1回目	4,821	4,821		
2回目				
3回目以降				

表-7 橋梁規模

橋長	90 m
総幅員	9 m
形式	3 径間単純鋼桁
塗装面積	2,000 m ²

以上の結果により、一般的な環境では重防食仕様の塗装系の方がLCCが安価となり、また、割引率の取り方や適用環境、設定条件あるいは橋梁規模などによっては、一般環境仕様の塗装系の方がLCCが安価となることもあり得ることがわかった。

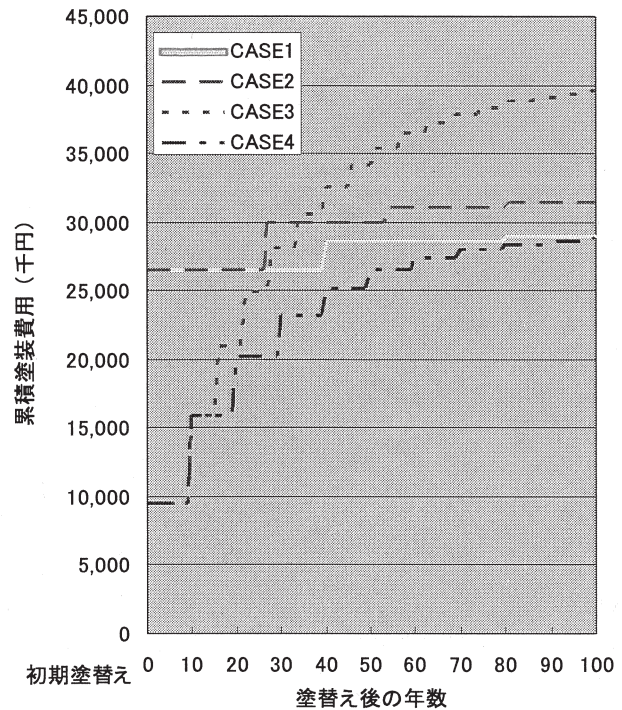


図-14 LCC 算出結果 (割引率 4%)

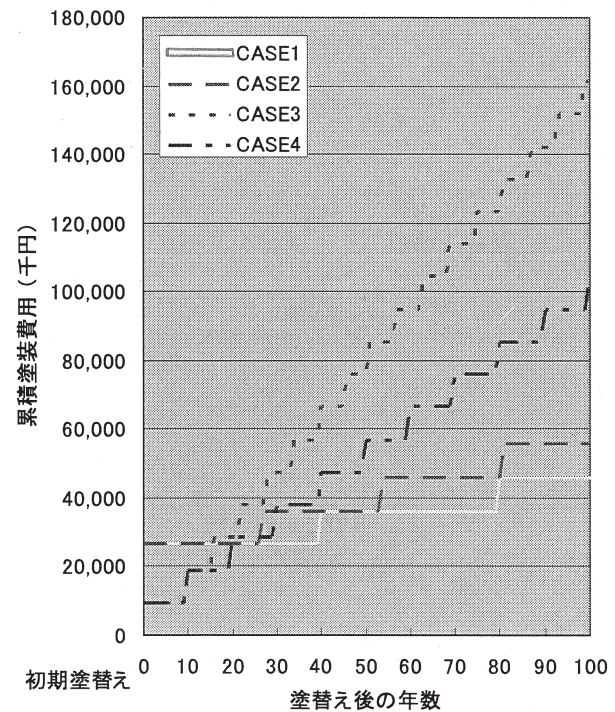


図-15 LCC 算出結果 (割引率 0%)

8. まとめ

本研究では、鋼橋の実態調査、および各種検証試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 鋼橋は今後多くの塗替え補修が必要となってくる
- (2) 塗膜の耐久性には素地調整の品質が影響しており、さびや付着塩分を十分除去しなければならない
- (3) ふっ素樹脂塗装のための素地上の適切な付着塩分量は 200mg/m² 程度以下と推測される
- (4) プラスト材の種類、洗浄圧力は付着塩分量の除去の効果にあまり影響しない
- (5) 洗浄水温度が高いほど付着塩分量の除去効果が高い傾向があり、スチームが一番望ましい
- (6) ISO Sa2^{1/2} のプラスト+洗浄では、海浜部の鋼橋相当の試験片の場合、付着塩分量を 200mg/m² 以下にすることはできなかった
- (7) ISO Sa3 のプラスト+洗浄では、海浜部の鋼橋相当の試験片の場合、付着塩分量を 200mg/m² 程度以下にすることができた
- (8) 促進試験により現況の鋼橋の付着塩分量を再現するための、複合サイクル試験日数と付着塩分量と相関式は直線近似できる
- (9) 一般的な環境では重防食仕様の塗装系の方が LCC が安価となる

以上の結果を踏まえ、Rc-I 塗装系で塗替えを行う場合の現場での素地調整は、次のような施工方法を推奨する。

- ・プラスト前に洗浄する場合は、十分乾燥させてからプラスト処理を行う
- ・プラストは Sa2^{1/2} 以上の除せいで実施する。可能な限り Sa3 が良い
- ・プラスト後は 3.5~4L/m² 以上の洗浄を行う。可能であればスチーム洗浄が良い
- ・洗浄を行う場合は、飛来塩分が鋼材素地上に付着しないように適切に養生する
- ・鋼材素地上の付着塩分量は 200mg/m² 程度以下となるように管理する

ただし、許容付着塩分量については、今回の検討結果はおおよその値であるので、正確な値を求めるためには、詳細な試験が必要である。

プラストの適切な除せいでについては、試験片では Sa3 という結果となったが、現場検証試験では Sa2^{1/2} でも十分に付着塩分を除去できているという結果も出ている。よって、更に多くの検証データにより判断すべきであると考え。しかし、現場試験を実施するに

は対象現場の調査やスケジュール調整、足場の問題など手間とコストがかかるので、今後の現場施工にあたっては、現場での施工管理の項目としてデータが蓄積されていくことが期待される。

参考文献

- 1) 建設省道路局企画課編：道路統計年報（2000 年度版）、2000.10.
- 2) 八木：道路橋ストックの現状と課題、第 24 回日本道路会議特定課題論文集、pp.68-69、2001.10.
- 3) (社)日本道路協会編：鋼道路橋塗装便覧、1990.6.
- 4) 藤原：鋼橋の防食保全技術、材料と環境、45、pp.439-446、1996.7.
- 5) 環境物品等の調達の推進に関する基本方針、2002.2.閣議決定.
- 6) 松田・藤原・佐久間：鋼橋塗装の実態調査－全国の塗膜劣化データの統計処理の評価－、日本道路公団試験所報告、28、pp.97-106、(1991).
- 7) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、2005.12.
- 8) ISO and SIS：塗料及びその関連製品の施工前の鋼材の素地調整－表面清浄度の目視評価－、ISO8501-1:1988(E/F/R)SIS055900、(1988).
- 9) (財)鉄道総合技術研究所編：塗膜劣化状態およびケレン程度見本帳、(1989).
- 10) (社)日本橋梁建設協会：改訂 鋼橋の付着塩分管理マニュアル.