

◆特集：戦略的な道路構造物マネジメント◆

# 長大橋における長期防錆型塗装系の採用によるLCCの低減

長谷川芳己\* 小林克己\*\* 長尾幸雄\*\*\* 山口和範\*\*\*\*

## 1. はじめに

本州四国連絡高速道路株式会社（以下、「当社」と言う）が管理する道路は3つのルートから成り総延長は約170kmである（図-1）。このうち海峡部の橋梁延長は約25kmであり、安全・安心・快適な交通路として、200年先の23世紀においても確実に機能を果たすため、万全の維持管理をすることとしている。

吊橋、斜張橋など海峡部橋梁の塗装概要を表-1に示すが、外面塗装面積は約380万m<sup>2</sup>にもなり、塗替塗装は、補修のなかで大きな比重を占めている。海峡部の塗替塗装は、①厳しい腐食環境にあること、②橋梁部材への近接作業に困難が伴うこと、③塗装面積が膨大で1橋の塗替塗装でも長期の施工期間を要することから、戦略的な管理が求められている。具体には、予防保全の考え方に基づき合理的な管理を行っており、局部補修塗装や部分塗替塗装により橋梁全体の塗膜劣化状態を平準化するとともに、塗膜精密調査結果による塗膜の劣化予測に基づき適切な時期に塗替塗装に着手

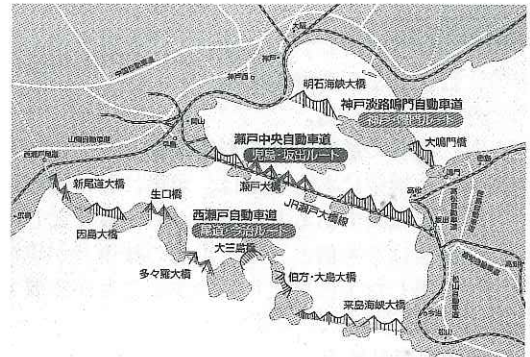


図-1 本州四国連絡高速道路の概要

することとしている。

また、フッ素樹脂上塗り塗装に代表される長期防錆型塗装系の採用によりLCC（ライフサイクルコスト）の低減を図っている。

## 2. 塗装仕様

本州四国連絡橋は、厳しい腐食環境下にあるため、耐久性に優れた重防食塗装系を採用している。第1層に用いられている無機ジンクリッジペイントは、金属亜鉛粉末を高濃度を含み、亜鉛の犠牲

表-1 本州四国連絡橋の外面塗装の概要

道路名	橋梁名	供用年月日	上塗塗装系	
			建設時	塗替塗装後 (塗替塗装を実施した橋梁の塗装系)
神戸淡路鳴門自動車道	明石海峡大橋	1998年4月5日	フッ素樹脂	—
	大鳴門橋	1985年6月8日	ポリウレタン樹脂	フッ素樹脂
瀬戸中央自動車道	瀬戸大橋	1988年4月10日	ポリウレタン樹脂	フッ素樹脂 (塗替塗装中)
西瀬戸自動車道	新尾道大橋	1999年5月1日	フッ素樹脂	—
	因島大橋	1983年12月4日	ポリウレタン樹脂	フッ素樹脂
	生口橋	1991年12月8日	ポリウレタン樹脂	—
	多々羅大橋	1999年5月1日	フッ素樹脂	—
	大三島橋	1979年5月13日	塩化ゴム系	フッ素樹脂
	伯方・大島大橋	1988年1月17日	ポリウレタン樹脂	—
	来島海峡大橋	1999年5月1日	フッ素樹脂	—

表-2 本州四国連絡橋の代表的な塗装仕様

塗装系 (上塗)	素地調整		第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	合計 膜厚
	1次	2次							
フッ素樹脂塗料	原板プラス ト+無機ジ ンクリッチ プライマー	製品 プラス ト	厚膜型無機 ジンクリッ チペイント  (75 μm)	ミス ト コー ト	厚膜型エポ キシ樹脂塗 料  (下塗) (60 μm)	厚膜型エポ キシ樹脂塗 料  (下塗) (60 μm)	エポキシ樹 脂塗料  (中塗) (30 μm)	フッ素樹脂 塗料  (上塗) (25 μm)	(255 μm)
ポリウレタン樹脂塗料	原板プラス ト+無機ジ ンクリッチ プライマー	製品 プラス ト	厚膜型無機 ジンクリッ チペイント  (75 μm)	ミス ト コー ト	厚膜型エポ キシ樹脂塗 料  (下塗) (60 μm)	厚膜型エポ キシ樹脂塗 料  (下塗) (60 μm)	ポリウレタ ン樹脂塗料  (中塗) (30 μm)	ポリウレタ ン樹脂塗料  (上塗) (30 μm)	(255 μm)

陽極作用による優れた防錆効果を有している。下塗り（表-2参照、第3、4層）は無機ジンクリッチペイントを保護する耐水性に優れたエポキシ樹脂塗料を用いている。また、表層（表-2参照、第6層）には耐久性に優れたフッ素樹脂塗料またはポリウレタン樹脂塗料を用いている。フッ素樹脂塗料は比較的最近に建設された明石海峡大橋、来島海峡大橋、多々羅大橋、新尾道大橋で採用されており、ポリウレタン樹脂は瀬戸大橋、大鳴門橋、因島大橋、伯方・大島大橋で採用されている。

### 3. 塗替塗装の仕様

本州四国連絡橋の塗替方針では、塗替する層を劣化した上塗り層（表-2参照、第6層）と中塗り層（表-2参照、第5層）に限定し、基層（表-2参照、第1層）の無機ジンクリッチペイントとその保護のための下塗り層（表-2参照、第3、4層）であるエポキシ樹脂塗料まで塗膜の損耗が達する前に全面塗替塗装をすることとしている。これは、全層の塗替を行うとなると、品質管理面、環境面で不利な現場プラスト処理が必要になり、コストが高くなるからである。ポリウレタン樹脂で塗装されている橋梁でも長期耐久性を考慮し、塗替塗装においてはより耐候性の高いフッ素樹脂塗料を上塗りすることとしている。その塗替仕様を表-3に示す。なお、局部的に下塗まで損傷が生じている個所については、局部補修、部分塗替塗装などにより対応している。

### 4. 塗膜点検

当社では、塗膜の変状を早期に発見し、塗膜全

表-3 塗替塗装の仕様

素地調整	第1層	第2層
4種	エポキシ樹脂塗料 (中塗) (30 μm)	フッ素樹脂塗料 (上塗) (25 μm)

体の健全度に関するデータを取得し、塗替塗装の維持管理の効率的な運用に関する中長期塗替計画の基礎資料を得るために塗膜点検を定期的実施している。

塗膜点検の種別には、橋梁全体の塗膜状態を定期的に把握するとともに塗膜変状を早期に発見してその対策を検討することを目的とした「塗膜基本点検」、橋梁各部位の塗膜状態を評価点付けして定量的に把握することにより、塗替塗装の具体的な実施計画の作成の資料を得ることを目的とした「塗膜評価点検」、塗膜状態を長期的視野から計測調査することにより客観的・定量的な把握を行い、中長期におよぶ点検および全面塗替計画策



写真-1 塗膜精密調査

定の資料を得ることを目的とした「塗膜精密調査」の3つがある。「塗膜精密調査」はあらかじめ設定された定点で実施することになっている(写真-1)。当社の要領<sup>1)</sup>でいう塗膜点検の方法、内容及び頻度を表-4に示す。

塗替塗装の種類選定の概略フローを図-2に示す。部分塗替塗

装、局部補修塗装は、塗膜基本点検で発見された塗膜変状を早期に対処し鋼材の腐食の進行を抑え、橋梁全体の塗膜の状態を均一化する目的で行われる。なお、橋梁点検時に発見された軽微でアクセスし易い個所の損傷はその場で補修を行うこととしている。

全面塗装塗替は、塗膜精密調査により得られた塗膜の劣化予測により塗替開始時期などの概略の計画を立て、塗替実施前に必要に応じて塗膜評価点検を行い総合的な塗膜状況の把握をし、塗替順序などの策定を行う。このように、部分塗替塗装、局部補修塗装により塗膜の状態を均一しつつ、精密点検により塗膜の損耗速度を正確に把握することによりLCCの低減に努めている。

### 5. 塗膜点検の事例

以下に、瀬戸大橋での塗膜点検結果の概要<sup>2)~4)</sup>を述べる。

#### 5.1 塗膜の状態

瀬戸大橋の塗膜の劣化現象は、剥離と塗膜厚の減少が主なものである。

剥離のほとんどは、上塗りと中塗りの間で起こっている。剥離の原因は、工場塗装の際、水分や油分、塩分などの不純物の除去が不十分であったか、高湿度で塗装が行われたためと考えられる(写真-2)。

塗膜厚が薄くなるエッジ部で劣

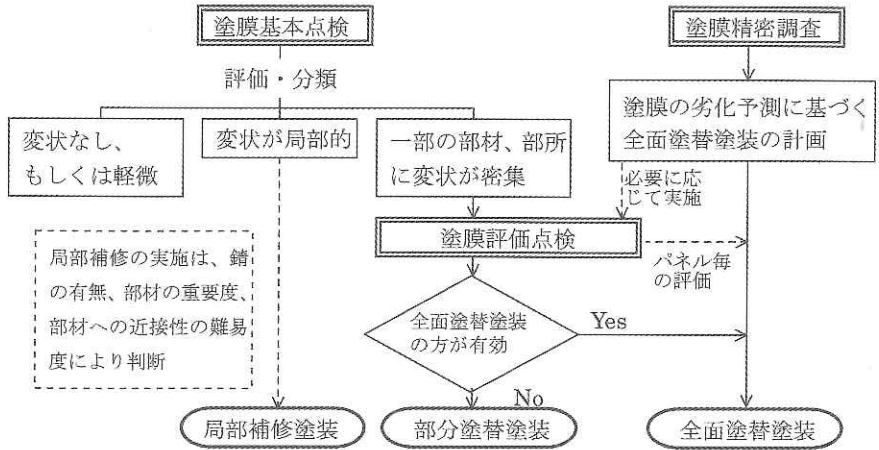


図-2 塗替塗装の種類選定概略フロー

表-4 海峡部橋梁の塗膜点検種別

点検種別	点検方法	点検内容	点検頻度
塗膜基本点検	管理路等及び点検補修作業車からの目視・触指	橋梁全体(全橋対象)の塗膜状態の全般的な把握を行う。 部位、部材別に塗膜の変状を評価点付けして詳細に把握を行う。 (錆、無機ジンク露出、はがれ・ふくれ、ひびわれ、白亜化)塗膜精密調査以後の塗替方法、順位見直しの基礎資料を得る。	1回/ 1~2年
塗膜評価点検			全面塗替塗装及び部分塗替塗装等の実施計画策定前
塗膜精密調査	当社「保全面積管理要領2-1定点塗膜調査」に基づく劣化度調査	計器測定を行う。計測結果(塗膜厚、光沢度、付着性)を基に中長期的視点から全面塗替塗装時期、順位の策定(点検、調査、塗替塗装計画立案)。	定点設置後、1、3、5年目、それ以後は5年毎(定点設置時を1年目とする)

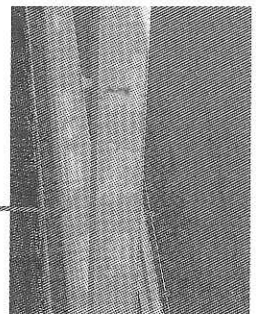
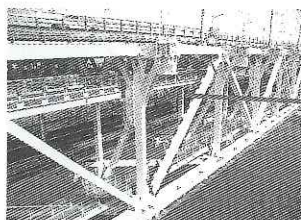


写真-2 トラス部材の塗膜の剥離

化が起きやすい(写真-3)。このため、平成元年以降の橋梁製作においては、エッジ部には半径2mm以上の丸みをつけることとされている。

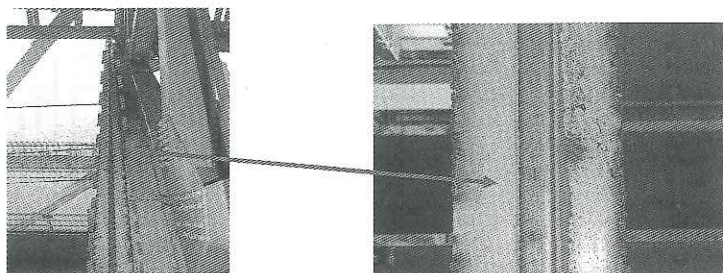


写真-3 エッジ部の塗膜の損傷

塗膜厚の減少の多くは継手部で生じている。この原因は、建設段階の継手部やボルト部の現場塗装は、刷毛塗りで行うため、塗膜厚が不均一となることと、作業の際、温度や湿度などが好ましくない条件で行われたためと考えられる(写真-4)。継手部については、平成11年以降は超厚膜型エポキシ樹脂による塗装系を採用し、改善されている。

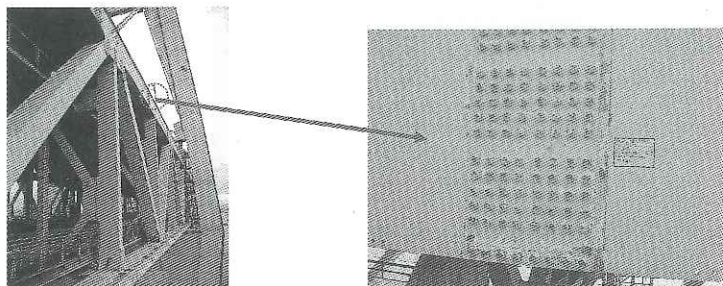


写真-4 添接部の塗膜の損傷

5.2 塗膜基本点検

塗膜基本点検では、2年毎に双眼鏡を用いて目視により塗膜変状面積・個所を記録するものであり、塗膜変状が早期に発見できる。図-3に、北備讃瀬戸大橋の補剛桁を例に、平成17年度末までの塗膜基本点検により得られた結果を整理したものを示すが、変状が特定のパネルに集中していることが分かる。

5.3 塗膜精密調査

塗膜精密調査の膜厚測定は、電磁式膜厚計と電子顕微鏡による方法がある。膜厚計測は、その目的が塗膜消失量の把握にあることから、1マイクロオーダーの計測精度が要求される。したがって、電磁式膜厚計は、このような測定には不向きと結論付けられ、当社の保全要領には平成14年度以降、塗膜片を採取し、直接塗膜を計測する破壊式の電子顕微鏡計測から得られる膜厚消耗データを基本とすることが正式に要領化された。参考のため、電子顕微鏡による塗膜断面を写真-5に示す。電子顕微鏡計測から瀬戸大橋の供用15年後の上塗

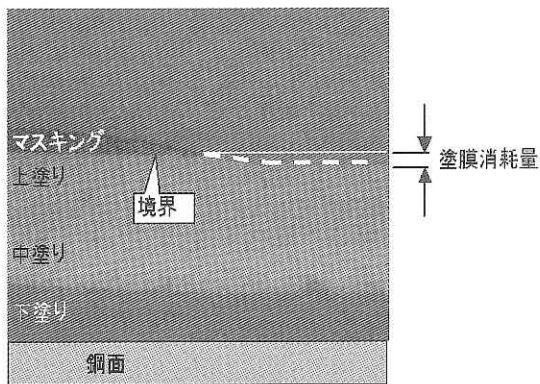


写真-5 電子顕微鏡による塗膜断面

り塗料(ポリウレタン樹脂)の塗膜消耗量 $5\mu\text{m} \sim 22\mu\text{m}$ の範囲で部位、方向等により、ばらつきはあるものの単純平均で $11\mu\text{m}$ 程度となっている。

5.4 附着性調査

目視では確認できない附着性の低下を調査する

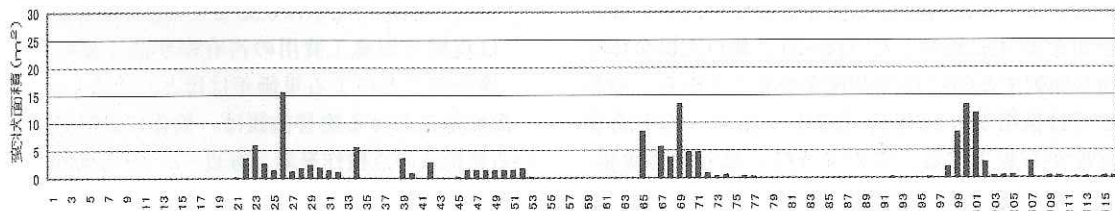


図-3 塗膜基本点検の結果 (北備讃瀬戸大橋の補剛桁)

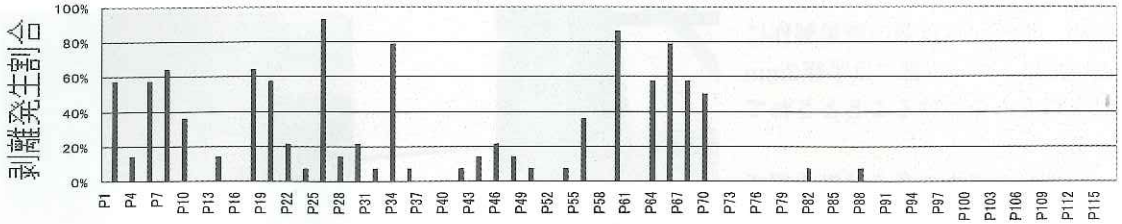


図-4 付着性調査の結果 (北備讃瀬戸大橋の補剛桁)

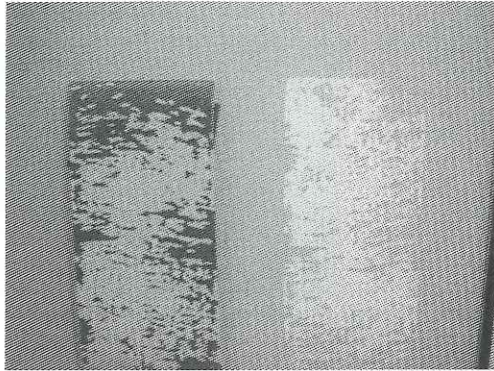


写真-6 塗膜剥離

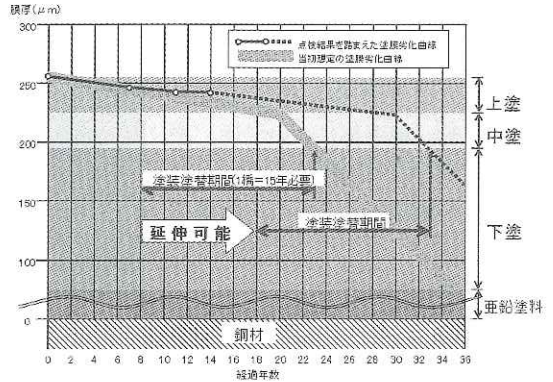


図-5 塗装劣化予想図 (瀬戸大橋の例)

ため、ガムテープによる付着性試験を2パネル毎の約3000個所で実施した。塗膜の剥離状況を写真-6に示す。また、図-4に、北備讃瀬戸大橋の補剛桁を例に、調査箇所数に対する剥離発生箇所数の割合(%)を示すが、剥離が特定のパネルに集中していることが分かる。ほとんどの剥離は、上塗りと中塗りの間で生じていた。

## 6. 塗替塗装のライフサイクルコスト(LCC)の試算

瀬戸大橋をモデルケースとして、塗替塗装のLCCの試算例を示す。

### 6.1 塗替時期の判断

定期的に塗膜厚を測ることにより、塗膜の損耗速度が得られる。瀬戸大橋の場合、想定していたより塗膜の損耗速度が遅く、当初、上塗り・中塗りが損耗するのに23年かかると予想していたが、この予想を33年に延伸した(図-5)。瀬戸大橋全体を塗替塗装するのに15年程度かかることから、塗替塗装は供用から18年目(33年-15年)の平成18年度から着手する。このように、部分塗替塗装、局部補修塗装により塗膜の状態を均一化しつつ、塗膜の損耗速度を正確に把握し適切な時期に全面

塗替塗装をすることによりLCCの低減に繋がっている。なお、塗替塗装は、塗膜点検結果に基づき、塗膜状態の悪い箇所から優先的に行うこととしている。

### 6.2 LCCの試算

LCCの算定は不確定要因が多く難しいが、瀬戸大橋の塗替塗装のLCCを以下の仮定に基づき試算した。結果を図-6に示す。当初想定した塗替計画(ポリウレタン樹脂塗料の上塗を使用)に比べて大幅にコストが縮減されている。

- 1) 塗替サイクルは上塗りがフッ素樹脂塗料では15年、ポリウレタン樹脂塗料では12年とする。(現場塗装であるため安全側に仮定)
- 2) 1年当たりの塗装面積は(全塗装面積/塗替サイクル)とする。
- 3) 上塗りがフッ素樹脂塗料とポリウレタン樹脂塗料の単価の比率は0.95とする。(コスト面では現場での施工費用の占有率が高く塗装系が異なることによる単価差はほとんどない)

海峡部における塗替塗装は、橋体に設置されている移動式の点検作業車(写真-7)を有効利用できるが、それ以外の足場にかかる費用など現場での施工費用が全体費用に占める割合が高い。なお

一層のコスト削減を図るため、現場施工の合理化に取り組んでいるところである。

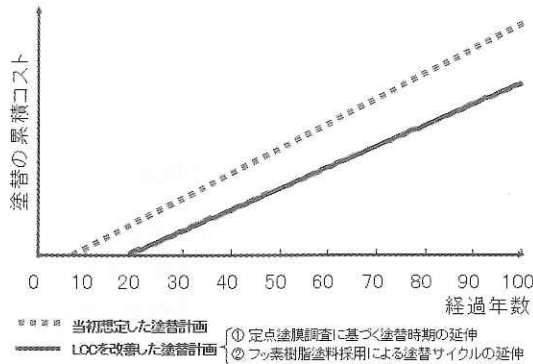


図-6 LCCの試算

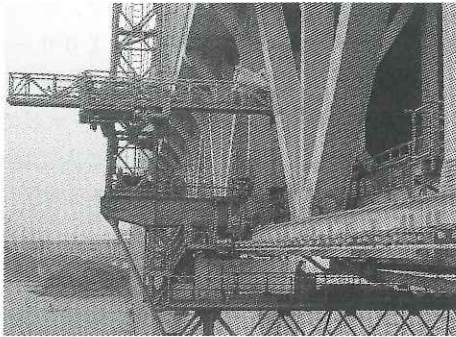


写真-7 桁外面作業車

- より、計画的な塗替塗装を行うことができる。
- 3) 長期耐久性に優れた重防食塗装を採用することによりLCCを改善できる。

明石海峡大橋などでフッ素樹脂塗料の点検結果が蓄積されつつあり、これらのデータは塗替塗装の合理化を図る上で有効である。また、今後は、耐久性が高く、下塗などとの付着性の良い新しい塗料の開発を行うことにより、長期に渡って万全な維持管理を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡高速道路(株) 保全管理要領、平成18年4月
- 2) 石橋清美、門田整達：供用後15年を経た海峡部長大橋梁群の塗装の状況、本四技報, Vol28, No.103, pp.33-38, 2004.9
- 3) 長尾幸雄：瀬戸大橋の塗膜評価、本四技報, Vol30, No.106, pp.21-26, 2006.2
- 4) 平原伸幸、帆足博明、斎藤哲男、小林克己：20年以上経過した長期防錆型塗装系の現況と管理手法、土木学会第60回年次学術講演会、平成17年9月

7. まとめ

以上で述べた塗替塗装の合理化のための取り組みの要約を以下に示す。

- 1) 塗膜の変状を早期に発見し、塗膜全体の健全度を把握できるよう詳細な塗膜点検を実施している。
- 2) 塗膜点検結果に基づき劣化予測を行うことに

長谷川芳己\*



本州四国連絡高速道路(株)  
保全事業部  
橋梁保全課長  
Yoshimi HASEGAWA

小林克己\*\*



本州四国連絡高速道路(株)  
保全事業部  
橋梁保全課長代理  
Katsumi KOBAYASHI

長尾幸雄\*\*\*



本州四国連絡高速道路(株)  
保全事業部  
橋梁保全課  
Yukio NAGAO

山口和範\*\*\*\*



本州四国連絡高速道路(株)  
東京事務所  
技術調整課長代理  
Kazunori YAMAGUCHI