JH における省工程塗装への取り組み

－ 鋼道路橋を対象として －

藤 原 博*

Attempt for Reducing the Painting Processes Steel Bridges in JH

Hiroshi FUJIWARA*

Key Words Steel Bridge, Painting, Anticorrosion, Life Cycle Cost, Image Processing, Repaint

JHでは、鋼橋塗装のライフサイクルコスト低減と塗装作業の省力化を目的とした様々な研究を行っているが、ここでは溶接・溶断性に優れた機能性プライマーを用いた塗装仕様について紹介し、その塗装系を採用することによるメリットについて述べる。

1. はじめに

日本道路公団（JH）の管理する高速道路および一般有料道路の延長は6600kmを超え、高速道路が国民生活に不可欠な社会資本として認識されるとともに、高度化する自動車社会の時代的な要請を受け、JH事業の効率的な推進、建設・管理の省力化、高速道路の老朽化対策など、多種多様な技術的課題への対応がますます重要となっている。

平成5年度から始まった「第11次道路整備5箇年計画」においても、高速道路の積極的な推進を図ることになっており、より効率的な高速道路の建設が必要になっている。一方、整備年代の古い路線は開通後20～30年を経過しており、老朽化の進行による維持管理業務が急増している。特に、近年の車両大型化および高速化に対応した補修・補強技術を確立していく必要があり、加えて、熟練労働者不足に対応した維持管理作業の省力化も求められている。

このような背景の中、JHでは鋼道路橋（以下「鋼橋」という）の防食を対象に、塗装作業の省力化およびコスト縮減を目的とした様々な取り組みを行っている。本文では、これらのうちいくつかについて紹介するとともに、第二東名・名神高速道路などで採用が予定されている新しい塗装仕様について、それらが決定した経緯について述べる。

2. 鋼橋塗装におけるライフサイクルコスト低減の考え方

構造物のライフサイクル（寿命）を考慮して、イニシャルコスト（初期建設費）とメンテナンスコスト（維持管理費＋改良費）の投資バランスおよび適切な補修時期と投資額を設定することで、トータルのライフサイクルコストを最小（最適）にすることがライフサイクルコストの概念である。すなわち、建設コストの見かけ（原価償却）の支出額（年価）と保全費用の支出（年価）が最小となるような経済耐用年数を設定することが、ライフサイクルコストを最小化する方法である。

これを鋼橋塗装に当てはめると、建設時に高価でも高防食性・高耐候性塗料を採用し、塗り替え

* 日本道路公団 試験研究所（〒194 東京都町田市忠生1-4-1）
Japan Highway Public Corp. Research Inst. (4-1,
Tadao 1-chome, Machida-shi, Tokyo 194)

図1 塗り替え工事費(単価)の内訳

周期を延伸することが鋼橋塗装のライフサイクルコストが最小になることを意味するが、その理由について次に述べる。

また塗り替え周期を延伸するには、高防食性・高耐候性塗料を用いるだけでなく、塗装方法や塗装系にも注意する必要があるが、それらについても述べる。

2. 1 塗り替え工事費の内訳

図1は、鋼橋塗装の塗り替え工事費(単価)の内訳を示したものである。この単価は、鋼橋塗装でもっとも一般的に用いられているA塗装系(鉛系錆止めペイント/長油性フタル酸樹脂塗料)の塗膜に対して、素地調整程度3種(動力工具によって、錆および劣化塗膜を除去し鋼材面を露出させ、劣化していない塗膜は残す)を行った上に、同じA塗装系で塗り替える場合の単価内訳である。

図1によると、塗り替え工事費の内訳は、材料費である塗料が僅か7.4%であるのに対して、素地調整、塗装作業および足場工等の占める割合が約90%を占めている。マイルドな腐食環境に用いられるA塗装系の平均塗り替え周期は一般に10年程度であるため、10年毎に塗り替えを行う必要があるが、塗り替えに要する費用のほとんどは、塗装の性能とは直接関係のない部分に費やされてしまう。

このことは、高い防食性と耐候性を持つ塗料があり、その塗料を用いることで塗り替え周期が20年になるとしたら、20年間に要する費用を考えると、単純には素地調整などの費用は二分の一になることを意味する。高い防食性と耐候性を持つ塗料の単価は当然高価になるが、仮に2倍、3

図2 塗装試験片の暴露試験結果(3年目)

倍なったとしても、塗り替え工事費全体に対しての増加は僅かなものである。

2. 2 全工場塗装の必要性

図2は塗装試験片(A塗装系)の暴露3年目の結果である。試験片は一般構造用圧延鋼材(JIS G 3101, SS 400)に表面粗さ約 $60\mu\text{m}$ のショットブラスト処理(Sa-2・1/2)を施し、下塗りの鉛系錆止めペイントを塗装した後に約6カ月屋外暴露した。暴露後、試験片の上半分は乾布拭きで清掃し、中・上塗りの長油性フタル酸樹脂塗料を塗装した。中塗り前の試験片の付着塩分量は $223\text{mg}/\text{m}^2$ であった。なお塗装試験片の上半分の塗装方法は、実際の鋼橋塗装の塗装方法を想定したものである。

一方試験片の下半分は水洗いを行い、上半分と同様に長油性フタル酸樹脂塗料の中・上塗りを塗装した。この場合の付着塩分量は $50\text{mg}/\text{m}^2$ 未満であった。なお塗膜には、鉄素地に達するカット傷を入れてある。

図2によると、試験板の上半分と下半分の塗膜劣化の差は明確であり、塗装工程における飛来塩分や塵あいなどの付着は塗膜の防食性に大きな影響を与えることが分かる。ここでは紹介しなかったが、下塗りに後に暴露せずに上塗りまでを塗装した試験片には、暴露3年目では全く塗膜劣化は生じておらず、その後約8年目の暴露でも塗膜劣化は僅かであった。

図3 塗膜下腐食 (×100)

下塗りから上塗りまでを一気に塗装する方法は、鋼橋製作時に工場内で塗装を完成する「全工場塗装」を想定している。

2. 3 素地調整時における塗膜下腐食の残存と塗り替え周期

図3は、顕微鏡で撮影した鋼橋の塗膜断面写真である。

この塗膜は全面塗り替えを行っているが、塗り替えの下塗り層の下には腐食が見られ、中・上塗り層とタッチアップ層との間には塗り替え時に付着したゴミが見られる。このような状態の塗膜は特別なものではなく、一般的な鋼橋塗膜の現状と考えられる。

塗り替え時の素地調整作業では、塗膜表面に劣化が見られない場合には塗膜下腐食はほとんど見逃され、塗膜表面を目荒らした程度で塗料が塗り重ねられている。また、現場条件下での塗装作業であることから、各塗膜の層間に異物が付着することを完全に防ぐことは困難である。

図4は、JHが管理する鋼橋のうち624橋を対象に、鋼橋塗装の塗り替え回数と塗り替え周期と

図4 塗り替え回数と塗り替え周期との関係

の関係を示したものである。図によると、各環境別ともに、新設から第1回目塗り替えまでの周期は約10年程度であるが、2回、3回と塗り替えるにつれて塗り替え周期が短くなっていくことが分かる。

この理由は、図3で示したように、塗膜下腐食のある塗膜の上に塗り替えを繰り返すことによると考えられる。

2. 4 MIO塗料による塗膜の早期はく離

工場塗装と現場塗装との塗装間隔が6ヶ月を超えることがあらかじめ想定される場合には、工場塗装(下塗り)後にMIO塗料を塗装し、現場で中・上塗りを塗装する塗装仕様がある。

最近海岸部に近い鋼橋で、塗装1年後にエポキシ樹脂MIO塗膜とポリウレタン樹脂塗膜との層間はく離(MIOの上層約10μmの層から)が見られた。

MIO塗膜の表面は、一般の塗膜の表面のように滑らかではなく、顔料のMIO粒子がりん片状に重なり合っている状態なので、かなり粗雑な粗い面となっている。このため、MIO塗膜表面に留まった異物は降雨程度では容易に除去されないのが普通であり、しかも外桁を除く内桁はほとんど降雨の影響を受けないため、塩分が付着した場合には濃縮されることになる。

このようなMIO塗膜の上にポリウレタン樹脂塗料を塗り重ねた場合、層間には濃縮された潮解性の塩分が存在するために、降雨がある毎に上層塗膜を浸透してきた雨水または結露水によって溶解し、層間付着性が低下しはく離したものと考えられる。

表 1 機能性プライマーの性能評価試験

項 目		無機ジंकリッチプライマー	機能性プライマー	エッチングプライマー
金属亜鉛含有量		80%以上	平均53%	0 %
溶 断 性		△	○	○
溶 接 性		△	◎	○
防 錆 性		◎	○	△
白さび発生性		△	○	—
塗 装 作 業 性		○	○	○
塗 り 重 ね 性		○	○	○
層間付着性	有機ジंकリッチペイント	△～×	○	×
	無機ジंकリッチペイント	○	○	×

- 1) 表中の評価記号は、◎：大変良い、○：良い、△：実用レベル、×：やや難有りを示す。
- 2) 本表は参考文献1)に、エッチングプライマーの全項目と層間付着性の項目を加筆している。
- 3) 参考文献1)では、改良品（新無機ジंकリッチプライマー）としているが、ここでは機能性プライマーと読み替えている。

2. 5 ライフサイクルコストの考え方

以上述べたように、鋼橋塗装のライフサイクルコストを考える場合、前述したように建設時にできるだけ耐久性のある塗料を用い、塗装作業を品質管理の徹底する工場内で完成させる（「全工場塗装」という）ことが、塗装のライフサイクルを延伸させ、ライフサイクルコストを低減させることになる。

3. 機能性プライマーを用いた塗装仕様

3. 1 機能性プライマーの特徴

前章で述べたように、鋼橋塗装のライフサイクルコスト低減のためには、現在の鋼橋塗装においては、高耐久性塗料の採用と全工場塗装が必須条件である。

そこで、JHでは腐食環境の厳しい海浜部においては、無機ジंकリッチペイント／エポキシ樹脂塗料／ポリウレタン樹脂塗料あるいはふっ素樹脂塗料あるいはシリコン変性アクリル樹脂塗料を用いた重防食塗装系を採用する一方、マイルドな腐食環境下では、従来のA塗装系（2. 1参照）に替わる塗装仕様として、塗膜厚を重防食塗装系の250 μmから160 μm程度に薄膜にした全工場塗装仕様の薄膜形重防食塗装系を採用することで検討を進めていた。

しかしこの重防食塗装系および薄膜形重防食塗装系において、原板ブラスト後に塗布される無機ジंकリッチプライマーは金属亜鉛含有量が

80%と多いため、桁製作時の溶接・溶断作業性が低く、ピットやブローホールなどの欠陥発生の原因ともなっている。また加工後に行われる製品ブラストにおいても、下塗りに無機ジंकリッチペイントを塗布するために高品質が要求され、鋼橋製作費縮減の大きな障害となっている。

そこで“高品質ブラストの必要がなく、かつ溶接・溶断作業性の大幅な向上が見込まれる、金属亜鉛含有量が50%前後と少ないプライマー（JHでは「機能性プライマー」と名付けた）”を用いた塗装仕様の検討を行った。

3. 2 機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装系

機能性プライマーの溶接および溶断性については、(社)日本橋梁建設協会防食部会において試験を実施し、優れた溶接・溶断性能を持つことが確認¹⁾されている（表1参照）。また機能性プライマー自体の防食性と塗装系としての防食性は、促進腐食試験と層間付着性試験によって確認²⁾されている。

なお高力ボルト摩擦接合で必要な接合面（接触面）のすべり係数も、(社)日本橋梁建設協会防食部会の協力によってすべり試験を実施し、想定したすべてのケースですべり係数は確保されることが判明している。

参考文献2)で検討した機能性プライマーを用いた塗装系U-5と、田園や山間部などマイルドな腐食環境下で用いられているA-1塗装系および海上や海岸など厳しい腐食環境下で用いられて

表2 機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装系と他の塗装系との比較

工 程		A-1	C-2 (重防食塗装系)	U-5 (薄膜形重防食塗装系)
前処理	ブラスト	SIS Sa 2.5	SIS Sa 2.5	SIS Sa 2.5
	プライマー	エッチングプライマー (15)	無機ジンクリッチプライマー (15)	機能性プライマー (17)
2次素地調整		SIS St 3	SIS St 3	Sa 1
下塗第1層		鉛系さび止め (35)	無機ジンクリッチプライマー (75)	有機ジンクリッチペイント (75)
ミストコート		——	ミストコート	——
下塗第2層		鉛系さび止め (35)	エポキシ樹脂塗料下塗 (60)	変性エポキシ樹脂塗料 (60)
下塗第3層		——	エポキシ樹脂塗料下塗 (60)	——
中 塗		長油性フタル酸樹脂 (30)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (30)	——
上 塗		長油性フタル酸樹脂 (25)	ポリウレタン樹脂塗料用中塗 (25)	ポリウレタン樹脂塗料 (25)
(合計膜厚)		(125)	(250)	(160)
期待する耐用年数		田園・山間などのマイルドな腐食環境で10年	海岸・海上などの厳しい腐食環境で15～20年	田園・山間などのマイルドな腐食環境で15～20年

注1: () 内は塗膜厚 μm を示す。

注2: 耐候性重視の場合は中・上塗りを次のように変更することができる。

・A-1 の場合には、長油性フタル酸樹脂塗料の代わりにシリコンアルキド樹脂塗料を用いる。

・C-2 および U-5 の場合には、ポリウレタン樹脂塗料の代わりにシリコン変性アクリル樹脂塗料またはふっ素樹脂塗料を用いる。

注3: 「期待する耐用年数」とは、A-1 は JH の 624 橋の実績データから、C-2 および U-5 は促進腐食試験結果から求めている。

いる C-2 塗装系を表2に示す。

機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装系は、重防食塗装系に比べて防食性は多少劣るものの、マイルドな腐食環境下における鋼橋の防食方法としては十分であり、この機能性プライマーを前処理に用い、製品ブラストをスウィープブラスト (Sa. 1 程度) とし、下塗りに有機ジンクリッチペイント (ミストコートが不必要) を用いることで、更に鋼橋制作費の縮減と工期短縮が図れる。

3.3 実橋における試験塗装

なお、機能性プライマーを用いた塗装系は、試験片による室内試験や屋外暴露試験の他、第二東海自動車道 (第二東名) はじめ JH 各地で試験塗装を実施あるいは計画している。

4. 新しい鋼橋構造に対する塗装仕様

鋼鈑桁形式の鋼橋を従来の桁配置で建設する場合、第二東名・名神の道路幅員ではその主桁本数は片側7本 (上下線合計14本) 程度になる。鋼材重量を削減し、施工の省力化および工期短縮を実現するためには、桁本数の少ない型式が有効であると考え、JH では主桁の少本数化を行い、鋼橋製作の省力化と経済性を図る予定である (図5参照)。

図5 鋼橋の少本数化

このように第二東名・名神を建設していくに当たり、コスト削減のために多くの技術開発が行われているが、鋼橋の防食からみると次のようである。

① 鋼橋の主桁を製作する際には、応力状態に応じて主桁断面を変化させているが、板厚や部材幅が頻繁に変化し、それに伴って突き合わせ溶接個

所も多数発生することになる。そこで主桁断面の変化を少なくし、部材幅も板厚のみで対応することで溶接個所の低減を図っている。これを防食面から見ると、接合部が少なくなり、塗装作業が容易になるとともに、塗装作業のロボット化の導入も可能となってくる。

②主桁の本数を減らし、構造を単純化することで鋼橋製作費の縮減を図ろうとしているが、複雑な部材の組み合わせが少なくなって平面部が多くを占めるために、塗装作業の効率が良くなるとともに塗装面積も削減される。ちなみに従来の4本主桁に比べ2本主桁の鋼橋になると、主桁1本当たりの形状寸法は大きくなるが塗装面積としては約半分になる。

3. 3節でも述べたが、これらの新しい構造の鋼橋塗装においても、機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装系が採用される予定である。

5. あとがき

JHにおける省工程塗装への取り組みとして、第二東名・名神などに採用が予定されている機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装系について紹介した。この新塗装系は、従来のA塗装系に代わる全工場塗装仕様として提案したものであり防食性、経済性および作業性ともに大きく向上すると考えられることから、鋼橋製作費の縮減と塗装のライフサイクル延伸に大きく寄与できるもの

と期待されている。

さらに、新設橋梁の場合では、現場塗装が不要となることから塗料ミストの飛散問題や桁清掃時に発生する塵あいや洗浄水などの問題が生じず、また、塗装のライフサイクルが延伸することは塗り替え回数が削減されることを意味するため、素地調整時の塵あいや塗料ミストの飛散問題も少なくなる。このように、全工場塗装仕様の薄膜形重防食塗装系は、環境にも優しい塗装仕様である。

しかし重防食塗装系および薄膜形重防食塗装系は全工場塗装となることから、今まで以上に鋼橋製作ラインにおける塗装作業の品質管理が重要となる。工場における鋼桁などの塗装作業と保管は、飛来塩分や塵あいなどの影響がなく、温度・湿度条件が整備された屋内で行うことが義務づけられるため、工場における品質管理が塗膜寿命を左右するといっても過言ではないと考える。鋼橋メーカーのより一層の理解と協力をお願いしたい。

(1997-4-9 受理)

文 献

- 1) (株)日本橋梁建設協会防食部会；無機ジンクリッチジョッププライマー試験報告書（平成7年3月）
- 2) 藤原 博；機能性プライマーを用いた薄膜形重防食塗装仕様－鋼橋製作費の節減と工場塗装の省力化を目指して－，第19回鉄構塗装技術討論会（(株)日本鋼構造協会，1996. 10）