

塗替え周期 50 年への挑戦

— 労働力減少社会に対応する塗装長寿命化戦略 —

○蔵治 賢太郎¹⁾

1. はじめに

首都高速道路(株)は、国内で最も多くの鋼道路橋を管理している道路管理者である。鋼橋の腐食防止と美観維持には定期的な塗装塗替えが不可欠だが、高齢化社会の到来に伴う就労人口の減少や、円安を背景とした外国人労働力の確保難により、塗装作業員の確保が今後厳しさを増していくことは容易に想像できる。さらに、近年の人件費および資機材費の高騰により、従来の予算規模では例年と同面積の塗装塗替えを実施することが事実上困難な状況に直面している。

『鋼道路橋防食便覧』(平成 26 年 3 月 31 日本道路協会、以下「便覧」)¹⁾において「重防食塗装系」とされる塗装仕様は、「ジンクリッチペイントの防食下地、腐食因子の遮断性に優れた下塗り塗料、耐候性に優れた上塗り塗料の塗り重ねによって構成され、海岸又は海上のような厳しい腐食環境において、新設塗装に期待される耐久性が 30 年以上となる塗装系」とされている。首都高速道路で耐候性に優れるとされる「ふっ素樹脂塗料」が重防食塗装仕様の上塗りに初めて採用されたのは、1993 年に開通した「レインボーブリッジ」である。しかし、供用後 30 年を待たずして上・中塗り層の消失による下塗り層の露出が顕在化し、東京オリンピック 2020 の開催前に美観改善を目的とした塗装補修を余儀なくされている(図 1)。



(a) ゴンドラを使った主塔の塗装補修



(b) 特殊高所作業者による横梁の塗装補修

図 1 レインボーブリッジの塗装補修状況

表 1 30 年前に採用された塗装仕様と現在の高耐久塗装仕様の比較

(a) レインボーブリッジの塗装仕様

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)
素地調整	ブラスト処理 ISO Sa 2 ½		
プライマー	無機ジンクリッチプライマー	(200)	(20)
2 次素地調整	ブラスト処理 ISO Sa 2 ½		
防食下地	無機ジンクリッチペイント	700	75
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160	-
下塗 1	エポキシ樹脂塗料下塗	300	60
下塗 2	エポキシ樹脂塗料下塗	300	60
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140	25

(b) 現在の高耐久塗装仕様 (C-5)

塗装工程	塗料名	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)
素地調整	ブラスト処理 ISO Sa 2 ½		
プライマー	無機ジンクリッチプライマー	(160)	(15)
2 次素地調整	ブラスト処理 ISO Sa 2 ½		
防食下地	無機ジンクリッチペイント	600	75
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160	-
下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540	120
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140	25

1) 首都高速道路株式会社 〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1

当時レインボーブリッジに採用された塗装仕様と現在の高耐久塗装仕様 (C-5) を表 1 に示す。30 年以上も経過しているのにも関わらず、鋼橋の塗装仕様はほぼ進歩していないことがわかる。

現在、鋼橋塗装に採用される塗料市場は仕様規定に基づいているため、各塗料メーカーは発注者側が定めた品質規格を満たしつつ、いかに低価格で製品を供給するかに注力する価格競争の構図となっている。この「仕様規定」の枠組みの下では、塗料の低価格化が促進される反面、要求水準を大きく超える高耐久化への技術開発インセンティブが働きにくいという構造的な課題がある。鋼橋の塗装仕様が 30 年以上も進歩しなかった主要原因であるが、実際は品質規格試験に合格する塗料をより低価格な原料で製造する開発に注力するあまり、30 年前の塗料よりも現在の塗料の方が耐久性に劣ってしまっている可能性すらある。実際に、首都高速道路が定めた品質規格試験に合格している複数社の塗料を千葉県銚子の試験場で屋外曝露した結果、わずか 4 年で顕著な白亜化 (チョーキング) が発生したものがある。

鋼橋の健全性を維持するため、現在首都高速道路(株)では、大規模修繕の枠組みを活用した鋼橋の全面塗装塗替えを推進している。塗替えの対象は、無機ジンクリッチプライマー上に塩化ゴム系塗料が塗布されていて塗膜剥がれが顕著となっている荒川湾岸橋等の橋梁、および急激な気温変化が生じると塗膜片が落下することがある鉛丹さび止め塗料が下塗りに採用されている橋梁である。塗替えは素地調整 1 種で塗膜を完全に除去し、高耐久性塗装仕様で塗装する。しかし、大規模な吊り足場を架設して既存塗膜を完全に除去したとしても、過去 30 年以上進歩していない現行の高耐久性塗装仕様を適用する限り、再び 30 年未満で塗替え時期が到来することは明白である。塗装作業員の確保、資機材費の高騰といった課題への対応だけでなく、ライフサイクルコスト (LCC) の観点や、維持管理に必要な財源確保の持続可能性を考慮すると、この短いサイクルで塗装塗替えを繰り返すことは社会的要請に合致しない。

首都高速道路(株)では、メンテナンス負担の軽減策として恒久足場の設置等も推進しているが、コスト的な制約から、既設橋の場合、その適用箇所は足場の設置に時間と費用を要する鉄道交差部、重交通幹線道路上、河川上などに限られる。したがって、既存の鋼橋ストックに対しては、現行仕様を凌駕する超高耐久性塗装の導入が不可欠なのである。

このような状況を打破するためには、塗料メーカーに塗料のさらなる高耐久化に向けた研究開発を促進して頂く必要がある。そのためには、発注者側が高耐久性を有した塗料しか合格しない新たな品質規格を提示し、優れた耐久性を有する塗料が適切に評価・採用される環境を整備する必要がある。新たな規格の策定にあたっては、現在の技術水準において 2~3 社程度の改良品のみが合格できる高い要求水準を設定することとした。これにより、いち早く基準をクリアした塗料メーカーには一定期間の市場的優位性 (先行者利益) が付与されると同時に、未達のメーカーに対しても新規開発への強力な動機付けとなる。これを 10 年間隔程度で繰り返すことにより、結果として日本の鋼橋用塗料の技術水準の底上げが図れるものと考えられる。

そこで、より過酷な促進耐候性試験を導入し、真に高耐久な塗料を選別する新たな品質規格の構築を試みた。本論文は、現在市場に提供されている各種ふっ素樹脂塗料、水性無機塗料、および各社が試作した改良品 (超高耐久塗料) の試験片を用い、従来のキセノンランプ法の代替として「メタルハライドランプ試験」、ならびにキセノンランプ試験に過酸化水素噴霧を組み合わせた「過酸化水素負荷型促進耐候性試験」の検証結果について報告するものである。

2. 促進耐候性試験における課題と限界

2.1 紫外線照射エネルギーを強化した試験の試行

次世代の超高耐久性塗料を正しく評価するためには、実環境における数十年分の劣化を短期間で再現する促進耐候性試験が必要不可欠である。現在、鋼道路橋塗装の耐候性評価にはキセノンアークランプ式の試験機が広く用いられているが、ふっ素樹脂塗料の場合、実環境で生じる白亜化を同試験で十分に再現できていないという課題があった。そこで、高耐久性塗料の定量的な比較・評価を可能とする新たな規格試験の確立を目指し、キセノンランプ試験の約 10 倍の紫外線照射が可能となるメタルハライドランプ式試験機を用いた過酷な促進耐候性試験を試行した (図 2)。

本試験では、放射照度 $1,400\text{W}/\text{m}^2$ という極めて高い紫外線強度を設定し、ブラックパネル温度 $63\pm 3^\circ\text{C}$ 、槽内湿度 $40\sim 60\%\text{RH}$ の条件下において、UV 照射 60 分 (うち 2 分間は水噴霧) を 1 サイクルとして、

合計 1,000 時間の連続試験を実施した。供試体には、現場塗装用の水性ふっ素樹脂塗料、工場塗装用の低汚染形ふっ素樹脂塗料、および各社から提供された次世代の超高耐久性塗料として期待されている水性無機塗料など、計 17 種の試験片を用いた。



(a) 試験機



(b) 試験機内部 (試験片設置状況)

図 2 メタルハライド式試験機

2.2 メタルハライドランプ試験の結果に見られる特異な挙動

1,000 時間の試験終了後、各試験片の外観、光沢保持率、色差、膜厚、白亜化、付着強度について測定した。その結果、全試験片において割れや剥がれといった塗膜の物理的な劣化は見られず、色差についても基準値 (10 以内) で推移した。

しかし、ふっ素樹脂塗料の劣化の明確な指標となる白亜化については、無機系塗料の 2 試験片で発生したものの、残り 15 種のふっ素樹脂系試験片においては全く確認されなかった。さらに特異な点として、一部の現行水性ふっ素樹脂塗料においては、試験後半 (500 時間以降) から光沢保持率が急激に低下し、最終的に 40%未満となったにも関わらず、白亜化や塗膜の減耗は一切確認されなかった。

加えて、膜厚の測定結果においても実環境とは異なる現象が確認された。通常の紫外線劣化であれば、塗膜表層の樹脂成分が分解・消失していくため、経年とともに膜厚は減耗する。しかし、本試験においては、全試験片において膜厚が減耗せず、逆に初期膜厚の 1.1~1.4 倍程度にまで厚くなる傾向を示した。これは、過酷な紫外線を照射しつつ水噴霧を繰り返したことで、塗膜が水分を含有し、実環境の劣化とは異なる「吸水膨潤」を引き起こしたためと推測された。

2.3 紫外線単独の促進による限界の考察

これらの試験結果から、メタルハライドランプ試験機を用いて紫外線強度を極端に高くする手法では、実際の橋梁で生じるふっ素樹脂塗料の白亜化プロセスを正しく再現することは困難であるという知見が得られた。追加で実施した水没試験等の結果から、過酷な紫外線と水分の複合的な作用によって塗膜を構成する樹脂の密度が低下し、吸水膨潤を引き起こした可能性が高いこともわかってきた。

このように、光沢保持率がいくら低下しても白亜化を伴わない劣化形態では、本来の耐久性を正しく評価することはできないのである。この知見に加え、近年首都高速道路のような都市内高架橋の場合、光沢の低い塗料が景観上好まれる傾向にあることも踏まえ、超高耐久性塗料の品質規格を定める際には、促進暴露した試験片の光沢保持率の試験項目自体を設けないことにした。

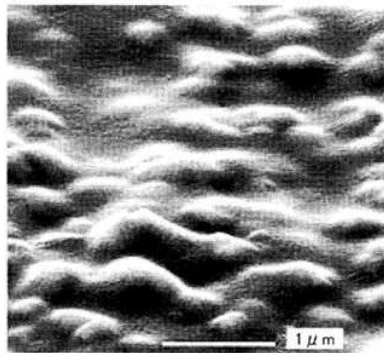
この試験により分子間の結合エネルギーが高い樹脂の劣化を促進させるためには、単なる紫外線の強度 (物理的エネルギー) を増すアプローチには限界があることが明らかになった。実環境での塗膜劣化は、紫外線による樹脂の直接的な破壊だけでなく、水分や酸素が関与した化学的な反応 (加水分解や光触媒反応等) が長期間にわたって複合的に作用することで進行する。つまり、紫外線強度が強すぎるあまり、実環境の複合劣化に不可欠な酸素や水分の供給が相対的に追いつかず、白亜化の原因となる光触媒作用などが正常に再現できていないと考えられる。

したがって、紫外線強度を上げることを以外のアプローチとして、実環境での化学的な劣化因子を試験環境内で意図的に再現・促進させる新たな試験方法を構築する必要性が浮き彫りとなった。

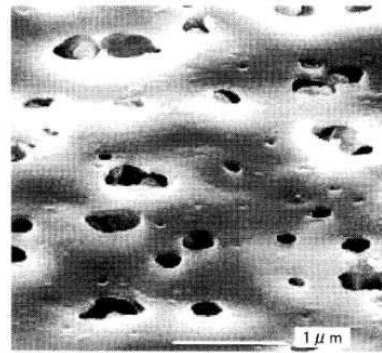
3. 実環境の塗膜劣化メカニズムの考察と新たな促進試験法の構築

3.1 実環境における塗膜劣化メカニズム

前章のメタルハライドランプ試験の結果から、ふっ素樹脂塗料の白亜化を促進するには、紫外線の物理的エネルギーに加えて化学的な劣化因子が必要であることが示唆された。館らの研究²⁾によれば、実環境（屋外曝露）における塗膜の劣化は、主に以下の2つの機構が複合的に作用することで進行するとされている。第一の機構は、光による樹脂の加水分解と酸化である。水分と酸素の存在下で紫外線が照射されることにより、塗膜全体で樹脂の加水分解が起こり、低分子量の生成物が塗膜から流出して樹脂全体が収縮し、凹凸を形成する（**図 3(a)**）。第二の機構は、顔料として含まれる酸化チタンの光触媒作用である。酸化チタン粒子周辺の樹脂が、光触媒反応によって発生したラジカルにより短時間のうちに酸化・分解され、顔料周辺部の樹脂が局所的に消失して微小な穴（ピット）を形成する。実環境の白亜化は、これら2つの機構が同時に進行した結果として現れる（**図 3(b)**）。



(a) 光による樹脂の加水分解と酸化



(b) 酸化チタンの光触媒作用

図 3 実環境の塗膜劣化メカニズム

3.2 過酸化水素水を用いた促進手法の提案と先行試験の課題

上記のメカニズムを試験室内で短期間に再現するためには、酸素・水・紫外線の組み合わせに加え、実環境での光触媒反応等で生じる「ラジカル」を強制的に供給する必要があると考えた。そこで、強力な酸化剤であり、紫外線照射によって高活性なヒドロキシラジカルを多量に生成する過酸化水素水（ H_2O_2 ）を促進因子として用いる試験法を考案した。

初期の検討として、キセノンアークランプ式の試験機を用い、過酸化水素水スプレー噴霧+UV 照射（1分）と、UV 照射のみ（4分）を組み合わせた5分サイクルの先行試験を実施した（**図 4**）。放射照度は標準値である $60 W/m^2$ とした。しかし、この先行試験において、溶剤形塗料では白亜化の促進傾向が見られたものの、水性塗料においては試験開始後 100 時間程度という極めて早い段階で、塗膜に異常な「膨張」や「剥がれ」が広範囲に発生する事態となった（**図 5**）。これは実環境の屋外曝露では見られない特異な劣化形態であり、このままでは水性塗料の耐久性を正しく評価できないことが判明した。



図 4 過酸化水素水供給装置を備えたキセノンアークランプ式試験機の例

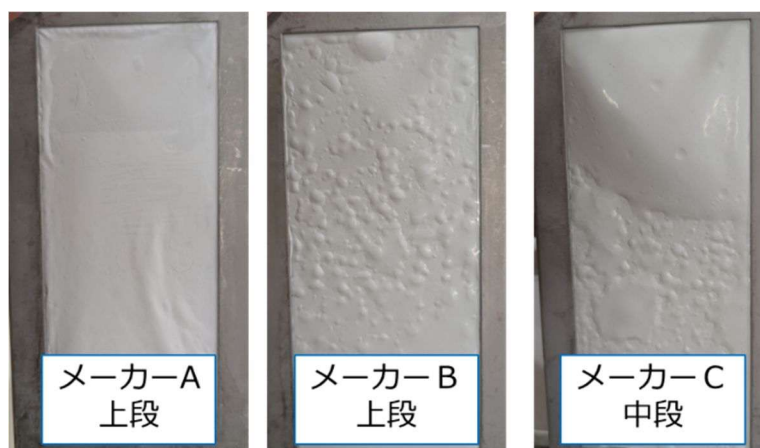


図 5 先行試験における水性塗料の異常膨張の例

3.3 塗膜の異常膨張のメカニズムの検証と純水洗浄サイクルの導入

水性塗料にのみ発生した異常膨張の原因を究明するために、表面乾燥試験等で検証した。その結果、過酸化水素水を噴霧した後に乾燥工程（紫外線照射のみの工程）に移行しても、塗膜表面や内部に過酸化水素の成分が残留・濃縮し、これが高い浸透圧を生み出して塗膜内部への急激な吸水（水分浸透）を引き起こしていることが推測された。特に親水性の高い成分を含む水性塗料において、この吸水膨潤が顕著に現れたと考えられる。

この課題を解決するためには、放射照度を抑えた状態でラジカル反応を促進させた直後に、塗膜表面に残留する過剰な過酸化水素を洗い流す工程が必要であると判断した。そこで、「純水スプレーによる洗浄工程」を新たに組み込むこととした。先行試験との違いを表 2 に示す。

最終的に、1 サイクルを 10 分間とし、①過酸化水素水スプレー噴霧+UV 照射（1 分）、②純水スプレー噴霧+UV 照射（2 分）、③UV 照射のみ（7 分）という、3 段階からなる「過酸化水素負荷型促進耐候性試験」の最適サイクルを確立した。この新サイクルを用いた後行試験では、水性塗料における異常膨張の発生が完全に抑制され、実環境の劣化形態に近い白亜化のみを短時間で抽出・促進させることに成功した。

表 2 先行試験と後行試験の違い

項目	先行試験	後行試験
試験装置	キセノンウェザーメーター	キセノンウェザーメーター
放射照度	60 W/m ²	60 W/m ²
H ₂ O ₂ 濃度	1.0 wt%	1.0 wt%
1 サイクルの時間	5 分	10 分
サイクル内訳	1. H ₂ O ₂ 噴霧+UV 照射：1 分 2. UV 照射のみ：4 分	1. H ₂ O ₂ 噴霧+UV 照射：1 分 2. 純水噴霧+UV 照射：2 分 3. UV 照射のみ：7 分
主な変更理由	劣化促進倍率の最大化を重視	水性塗料の膨張抑制 実環境への近似

4. 過酸化水素負荷型促進耐候性試験による評価と考察

4.1 過酸化水素負荷型試験と屋外曝露試験の相関性検証

前章で確立した純水洗浄工程を含む新たな過酸化水素負荷型促進耐候性試験（1 サイクル 10 分）を用い、塗替え周期 50 年を実現しうる「真の高耐久性塗料」を適切に選別できるかの比較評価を実施した。

現在市場に流通している現行のふっ素樹脂塗料（水性および溶剤形）と、各塗料メーカーが本検討に合わせて試作した次世代の超高耐久性塗料（水性無機塗料や水性ふっ素樹脂塗料の改良品等）の計 18 種類（メタルハライド試験から 1 種追加）の試験片を対象とした。試験は最大 700 時間（4,200 サイクル）

を目標に実施し、一定時間ごとに白亜化等級、光沢保持率、および膜厚増減を測定した。白亜化等級の結果を表 3, 4, 光沢度保持率の結果を表 5, 6, 膜厚の変化を表 7, 8 に示す。

表 3 ふっ素樹脂塗料の白亜化等級(白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
溶剤形 ふっ素 (汎用品)	A-1	4	5	✖	✖	✖	✖	
	A-2	4	5	✖	✖	✖	✖	
	B-1	3	4	5	✖	✖	✖	
	B-2	3	4	5	✖	✖	✖	
	C-1	4	4	5	✖	✖	✖	
	C-2	3	4	5	✖	✖	✖	
水性ふっ素 (汎用品)	A-1	4	5	✖	✖	✖	✖	
	A-2	4	5	✖	✖	✖	✖	
	B-1	1	3	5	✖	✖	✖	
	B-2	2	3	5	✖	✖	✖	
	C-1	0	0	1	3	5	✖	700h で異常膨張
	C-2	1	1	1	3	5	✖	700h で異常膨張
水性ふっ素 (改良品)	A-1	4	5	✖	✖	✖	✖	
	A-2	4	5	✖	✖	✖	✖	
	B-1	0	0	0	0	0	0	白亜化無し
	B-2	0	0	0	0	0	0	白亜化無し

表 4 水性無機塗料の白亜化等級(白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
水性無機	C-1	0	0	0	0	0	0	500h で微細膨張
	C-2	0	0	0	0	0	0	500h で微細膨張
	D-1	1	1	1	2	3	3	
	D-2	1	1	1	2	3	3	
	E-1	0	0	0	0	0	0	白亜化無し
	E-2	0	0	0	0	0	0	白亜化無し
	F-1	0	1	2	3	4	5	700h で異常膨張
	F-2	0	1	2	3	4	5	
	G1-1	3	4	5	✖	✖	✖	
	G1-2	3	4	5	✖	✖	✖	
	G2-1	3	3	5	✖	✖	✖	
	G2-2	3	4	5	✖	✖	✖	
	H-1	0	0	0	0	0	0	白亜化無し
	H-2	0	0	0	0	0	0	白亜化無し
	I-1	4	4	5	✖	✖	✖	
	I-2	4	5	✖	✖	✖	✖	

表 5 ふっ素樹脂塗料の光沢度保持率(白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
溶剤形 ふっ素 (汎用品)	A-1	2.9	3.1	×	×	×	×	
	A-2	3.0	2.9	×	×	×	×	
	B-1	3.0	3.0	2.8	×	×	×	
	B-2	3.5	3.4	3.5	×	×	×	
	C-1	7.1	7.9	5.9	×	×	×	
	C-2	12.1	8.4	6.4	×	×	×	
水性ふっ素 (汎用品)	A-1	4.0	4.1	×	×	×	×	
	A-2	4.9	5.7	×	×	×	×	
	B-1	46.6	6.2	3.5	×	×	×	
	B-2	14.0	8.3	3.7	×	×	×	
	C-1	71.0	46.1	20.3	5.3	2.3	×	700h で異常膨張
	C-2	64.5	35.8	13.8	3.6	2.1	×	700h で異常膨張
水性ふっ素 (改良品)	A-1	4.0	3.5	×	×	×	×	
	A-2	4.0	3.5	×	×	×	×	
	B-1	96.3	92.5	91.3	90.7	85.3	81.3	白亜化無し
	B-2	94.1	95.3	95.1	92.7	87.2	85.3	白亜化無し

表 6 水性無機塗料の光沢度保持率(白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
水性無機	C-1	69.8	56.3	57.8	44.1	29.4	25.3	500h で微細膨張
	C-2	68.8	55.9	56.2	51.0	37.9	26.5	500h で微細膨張
	D-1	39.5	38.2	33.3	28.2	21.9	20.3	
	D-2	43.3	42.4	32.6	25.4	18.6	23.5	
	E-1	87.1	82.3	49.5	30.1	23.7	25.3	白亜化無し
	E-2	96.1	91.3	52.8	34.8	25.9	26.6	白亜化無し
	F-1	81.5	71.1	62.9	34.8	18.4	17.4	700h で異常膨張
	F-2	90.7	81.4	61.4	39.4	20.5	22.4	
	G1-1	33.9	34.1	33.9	×	×	×	
	G1-2	34.6	35.0	35.6	×	×	×	
	G2-1	7.4	7.5	7.9	×	×	×	
	G2-2	12.0	10.4	9.5	×	×	×	
	H-1	80.2	81.7	78.1	82.9	75.1	75.3	白亜化無し
	H-2	67.7	68.1	64.2	61.8	68.1	61.4	白亜化無し
	I-1	3.8	3.4	3.2	×	×	×	
	I-2	3.3	3.3	×	×	×	×	

表 7 ふっ素樹脂塗料の膜厚の変化 (μm) (白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
溶剤形 ふっ素 (汎用品)	A-1	-12.4	-11.7	×	×	×	×	
	A-2	-12.9	-12.4	×	×	×	×	
	B-1	+0.5	-7.8	-1.9	×	×	×	
	B-2	-10.8	-11.2	-15.7	×	×	×	
	C-1	-6.1	-9.8	-10.1	×	×	×	
	C-2	-5.2	-5.9	-9.1	×	×	×	
水性ふっ素 (汎用品)	A-1	-8.4	-18.2	×	×	×	×	
	A-2	-5.1	-19.1	×	×	×	×	
	B-1	-0.9	-4.4	-10.0	×	×	×	
	B-2	-9.4	-11.3	-7.5	×	×	×	
	C-1	-5.8	+3.1	-5.9	+1.6	+64.6	×	700h で異常膨張
	C-2	-4.5	-6.6	-5.6	-4.4	+91.2	×	700h で異常膨張
水性ふっ素 (改良品)	A-1	-6.8	-12.2	×	×	×	×	
	A-2	-5.6	-5.7	×	×	×	×	
	B-1	-7.3	-9.2	-8.1	-7.7	-4.5	-11.7	白亜化無し
	B-2	-6.8	-9.4	-11.4	-8.9	-2.8	-8.9	白亜化無し

表 8 水性無機塗料の膜厚の変化 (μm) (白亜化等級 5 で試験終了)

塗料	塗料会社 -番号	経過時間						外観
		300h	400h	500h	600h	700h	800h	
水性無機	C-1	-7.3	-4.8	-7.5	-4.1	-1.2	+9.7	500h で微細膨張
	C-2	-3.8	-3.5	-4.8	-9.6	+1.8	+7.9	500h で微細膨張
	D-1	-4.3	+1.3	-8.5	+1.1	-5.3	+0.4	
	D-2	+20.1	+11.7	-8.4	+1.6	-18.4	-1.9	
	E-1	+5.8	-12.7	+2.3	-4.4	-4.4	-9.4	白亜化無し
	E-2	-6.6	-14.4	-15.9	-15.6	-8.3	-12.3	白亜化無し
	F-1	+6.5	+18.2	-23.8	-8.3	+38.1	+3.2	700h で異常膨張
	F-2	-8.0	-16.7	-5.3	-16.4	-6.5	+1.6	
	G1-1	-16.2	-17.9	-20.0	×	×	×	
	G1-2	-4.0	-29.4	-20.1	×	×	×	
	G2-1	-7.2	-3.3	-3.3	×	×	×	
	G2-2	-8.2	0.0	-6.3	×	×	×	
	H-1	-2.4	-4.1	-18.9	+10.2	+5.9	-4.6	白亜化無し
	H-2	+6.0	-17.7	-0.7	-12.0	+6.0	-10.8	白亜化無し
	I-1	-3.9	-10.0	-10.3	×	×	×	
	I-2	-6.9	-6.8	×	×	×	×	

4.2 300 時間経過時点における劣化傾向

現行の溶剤形ふっ素樹脂塗料は、全ての製品で白亜化が等級 3~4 に達したのに対し、水性ふっ素樹脂塗料では A 社は A-1・2 とともに 4 に達したのに対し、C 社の C-1 はまったく白亜化せず、塗料会社によって耐久性に大きな差があることが判明した。溶剤形ふっ素樹脂塗料では白亜化の進行と光沢保持率に相関が見られ、5/6 の試験体が一桁まで激減した。これに対し、水性ふっ素樹脂塗料では A 社の A-1 の光沢がわずか 4% まで低下したのに対し、白亜化しなかった C 社の C-1 は 71% も保持していた。

水性ふっ素樹脂塗料そのものを改良した塗料 A 社の塗料 (A-1・2) は白亜化の等級が既に 4 に達しており、光沢保持率もわずか 4%まで低下した。これに対し、水性ふっ素樹脂塗料上に透明な塗料を塗布する B 社の改良塗料 (B-1・2) は白亜化が生じず、光沢保持率も 90%以上を維持した。

次世代の高耐久性塗料として期待される水性無機塗料も塗料会社によって耐久性に大きな差があることが判明した。7 社の塗料のうち、この時点で白亜化等級が 3 もしくは 4 に達した塗料が 2 社あった (G・I) 反面、残りの 5 社 (C・D・E・F・H) の塗料は白亜化等級 0 もしくは 1 であった。しかし、白亜化が生じていない塗料の中には光沢が著しく低下したものがあつた。

4.3 400 時間経過時点における劣化傾向

現行の溶剤形ふっ素樹脂塗料の劣化がさらに顕著となった。多くの現行品が白亜化等級 4~5 に達し、塗膜表面の劣化が進行していることが目視でも確認された。白亜化等級が 5 に達した A 社の塗料 (A-1・2) はここで試験を終了することにした。同じく水性ふっ素樹脂塗料の改良品として提供された A 社の塗料 (A-1・2) も白亜化等級が 5 に達してしまつたため、試験を終了した (この時点で A 社の塗料は全て終了となつた)。透明な塗料を塗布する B 社の改良品 (B-1・2) では変状が見られなかつた。

一方、水性無機塗料は 300 時間で白亜化が生じた G 社と I 社の塗料で白亜化がさらに顕著になり、I-2 が等級 5 に達して終了となつた反面、C・E・H 社の塗料は白亜化等級 0 を維持した。

4.4 500 時間経過時点における劣化傾向

現行の溶剤形ふっ素樹脂塗料はすべて白亜化等級が 5 に達し、試験終了となつた。水性ふっ素樹脂塗料も C 社の塗料 (C-1・2) を除きすべて 5 に達した。しかし、水性ふっ素樹脂塗料上に透明な塗料を塗布する改良品 (B-1) は依然として白亜化が生じなかつた。

水性無機塗料は、G・I 社の塗料が等級 5 に達して試験終了となつた反面、C・E・H 社の塗料は依然として白亜化が生じなかつた。しかし、このうち C 社の塗膜 (C-1・2) 表面に微細な膨張が一面に発生する特異な現象が確認された (図 6)。

この段階で早くも白亜化が生じず、微細な膨張も生じていない塗料は 3 社の製品に絞られたが、各塗料の究極的な限界性能および劣化の進展プロセスを詳細に把握するため、すべての塗料の健全性が失われるまで最大 1000 時間まで試験を継続することとした。



図 6 水性無機塗料の特定の塗料試験片上に発生した微細な膨張

4.5 600 時間経過時点における劣化傾向

現行の水性ふっ素樹脂塗料で唯一試験を継続していた C 社の塗料 (C-1・2) の白亜化等級が 3 に達した。透明な塗料を塗布する改良品 (B-1・2) は依然として白亜化が生じなかつた。

水性無機塗料は 500 時間で白亜化が生じなかつた C・E・H 社の塗料は依然として白亜化が生じなかつたものの、塗膜表面に微細膨張が発生した C 社の塗料は、膨張が顕著となつた。また、E 社の塗料 (E-1・2) は白亜化は全く生じていないものの光沢度が 30%台まで低下した。

4.6 700・800 時間経過時点における劣化傾向

現行仕様で唯一生き残っていた C 社の水性ふっ素樹脂塗料 (C-1・2) の白亜化等級が 5 に達した。

この時点における光沢保持率はわずか 2% で異常膨張が発生し、塗膜厚が激増していた。しかし、水性ふっ素樹脂塗料上に透明な塗料を塗布する改良品 (B-1・2) は、この時点でも白亜化が全く生じず、光沢保持率も 80% 以上を維持するなど、現行塗料とは別次元の耐候性を有していることが確認された。

水性無機塗料は C・E・H 社の塗料が依然として白亜化等級 0 であったが、E 社の塗料 (E-1・2) の光沢度はわずか 20% 台まで落ち込み、塗膜表面に微細な膨張が一面に発生していた C 社の塗料 (C-1・2) も光沢度が 20% 台まで落ち込んだ。H 社の塗料 (H-1・2) の光沢度は 60~70% 台まで減少した。

本試験は現在も継続中なため、900~1000 時間の試験結果は今回の技術発表大会で報告予定である。

4.7 性能規定化による市場牽引への展望

以上の評価結果から、本試験法における所定時間 (例えば 3 製品のみが性能を維持した 600 時間~1000 時間) を新たな品質規格として設定することは、超高耐久性塗装を選定するための技術的根拠として妥当であると考察できる。ふっ素樹脂などの特定の樹脂名を指定する「仕様規定」ではなく、過酷な促進試験による「高耐久性規定」を導入することで、上塗り上に塗布する透明塗料や水性無機塗料などの新規材料の採用への道も開かれるものと考えられる。発注者がこの高いハードルを提示し、要件を満たした塗料を優先的に採用する仕組みを構築することで、業界全体の技術開発インセンティブが強力に刺激され、鋼橋塗装の長寿命化が進むようになると思われる。

5. おわりに

本稿では、就労人口の減少や維持管理費用の高騰といった社会的課題を背景に、鋼道路橋塗装の塗替え周期を現行の 30 年程度から 50 年超へと長期化させるための「超高耐久性塗装」の実現に向けた新たな評価手法について検討した。得られた主な知見を以下にまとめる。

- (1) メタルハライドランプ試験のように、単に紫外線の物理的エネルギーを強化するだけでは、実環境における劣化 (白亜化) を正しく再現できないことが確認された。これは、塗膜劣化が紫外線だけでなく、水分や酸素が関与した化学的な反応 (加水分解や光触媒反応等) の複合作用であることを裏付けるものであった。
- (2) 実環境の劣化メカニズムを促進・再現するため、強力な酸化剤である過酸化水素水を導入した新たな試験法を考案した。初期試験で生じた異常膨張に対しては、純水スプレーによる洗浄工程をサイクルに組み込むことで解決し、実環境の劣化形態に近い白亜化のみを抽出することに成功した。
- (3) 同試験において現行の溶剤形および水性ふっ素樹脂塗料、ふっ素樹脂塗料の改良品、透明の上塗り塗料、および次世代の超高耐久性塗料として期待されている水性無機塗料を本試験で比較した結果、これらの耐久性の差異を定量的に判別できることが実証された。
- (4) 水性無機塗料の場合、白亜化が生じなくても光沢度が著しく低下する塗料があることが判明した。

今後、本研究により確立した過酸化水素負荷型促進耐候性試験の結果と、宮古島などで実施中の屋外曝露試験での塗膜劣化状況との相関について検証していく予定である。本試験が数十年先の実環境における塗膜の耐久性を短期間で高精度に予測し得る画期的な評価指標であると判断された場合、首都高速道路(株)では、本試験法を用いた高い要求水準を新たな品質規格として定めた技術要領を発刊し、真に優れた超高耐久性塗料を市場から選別・採用していく方針である。

発注者自らがハードルとなる新たな規格を提示することは、塗料メーカー各社の技術開発に対する強力なインセンティブとなり、ひいては日本のインフラメンテナンス業界全体の技術水準の底上げに直結する。本取り組みが、日本の鋼橋におけるライフサイクルコストの縮減と、将来にわたる持続可能なインフラ維持管理の実現に向けた大きな一歩となることを期待する。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014
- 2) 館：過酸化水素水を用いた塗膜の耐候性試験技術，色材協会誌，77 巻 5 号，pp. 213-220，2004