

15.5 鋼橋塗装の性能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎 到、富山 禎仁

【要旨】

本研究では、鋼道路橋塗装の設計基準の性能規定化において参考となる基礎的な技術資料の作成をめざし、鋼橋防食のために塗料・塗装が備えるべき諸性能・機能について明らかにするとともに、これらを的確に評価できる試験評価技術の確立を目的としている。平成 25 年度は、これまでの調査結果をもとに設定した鋼道路橋塗装の性能評価項目に対する試験評価方法と性能基準値に関する検討を実施した。鋼道路橋塗装・防食便覧に規定されている新設用塗装系（C-5 塗装系）を標準塗装系と位置付け、促進耐候性試験（キセノンランプ法）や複合サイクル腐食試験等の促進劣化試験を実施し、促進劣化試験前後における塗膜外観、光沢・色彩、切り込み傷からの発せい状況、塗膜付着力、塗膜の電気的特性等のデータを収集した。

キーワード：鋼橋塗装、塗料、塗装系、防食性、耐候性、性能規定

1. はじめに

鋼道路橋のライフサイクルコストの縮減は、社会的な要請である。従来、鋼道路橋の維持管理には塗装による防食技術が大きな位置を占めており、塗装技術や塗料の高性能化、低コスト化により、構造物の維持管理コスト、ひいてはライフサイクルコストを効果的に縮減できるものと期待される。ところが、現在の塗装設計基準は、使用する塗料の種類や使用量、施工方法などの塗装仕様が規定されたいわゆる「仕様規定」となっているため、新技術や新材料の導入の自由度が低いのが現状である。このため、塗装設計基準を性能規定に移行させ、合理的で多様な開発による、塗料・塗装技術の品質・性能の向上やコスト縮減が促進される環境の整備が求められている。

そこで本研究では、材料の制約なく自由な発想で新材料を開発できる環境の整備を図るために、鋼橋塗装に求められる要求性能を整理し、塗料・塗装の的確な性能評価技術に確立に取り組むことで、塗装設計基準の性能規定化において参考となる基礎的な技術資料の作成をめざすこととした。

2. 研究の概略

本研究は、以下の手順で進めることとした。

①既往の研究の調査や文献調査、塗料メーカーなどとの情報交換を十分に行い、鋼橋塗装に必要な要求性能の設定を行う。また、これと併行して、現行の性能評価技術について整理する。

②①で設定した要求性能ごとに、現行の性能評価技術を基礎に実験的検討を行い、必要に応じて新しい性能評価技術について検討する。

③それぞれの性能評価技術に基づき、各種塗料の性能を評価して基準値を導き、技術資料として取りまとめる。

平成 25 年度は、過年度に設定した鋼道路橋塗装の性能評価項目に対する試験評価方法と性能基準値に関する検討の一部として、主に塗膜の防食性および耐候性に関する試験・評価を実施した。鋼道路橋塗装・防食便覧に規定されている新設用塗装系（C-5 塗装系）を標準塗装系と位置付け、複合サイクル腐食試験や促進耐候性試験（キセノンランプ法）等の促進劣化試験を実施し、試験前後における塗膜外観、光沢・色彩、切り込み傷からの発せい状況、塗膜付着力等のデータを収集した。

3. 鋼道路橋塗装の性能評価項目と従来行われている試験評価方法

過年度に実施した文献調査の結果に基づき、鋼道路橋塗装に求められる性能（要求性能）と、それを確保するために必要と思われる性能評価項目を整理し、表 - 1 にまとめた。鋼道路橋塗装の標準的な技術基準としては、「鋼道路橋塗装・防食便覧」（日本道路協会、平成 17 年 12 月）があり、この中で基本とすべき塗装仕様や品質規格、試験方法などが規定されている¹⁾。鋼道路橋塗装・防食便覧における新設鋼道路橋用の標準的な塗装系を表 - 2 に示す。現行の塗装系では異なる性能を持つ複数の塗料を塗り重ね、塗膜全体として必要な機能を発揮させ

るようにしており、個別の塗料（たとえば、エポキシ樹脂塗料下塗、ふっ素樹脂塗料上塗など）毎に表 - 1 の性能評価項目から取捨選択されて試験項目が設定され、塗料毎に異なる性能水準が規定されている（表 - 2）。一方で、鋼道路橋塗装の性能規定化のメリットは、材料や工法を選定する自由度を大きくし、新しい技術がより簡潔に、より迅速に評価され得ることにある。そのためには、塗装系を構成する個々の塗料の組み合わせは受注者の裁量に任せ、材料規格や施工基準を必要最小限のもののみとする必要がある。したがって本研究では、個々の塗料に対して品質規格を設定するのではなく、塗装系全体としての性能が現行の塗装系と同等以上であることを担保できる、より実用的で合理的な品質規格を作ること为目标としている。そのためにまずは、表 - 2 に示した現行の C - 5 塗装系を「標準塗装系」と位置づけ、表 - 1 をもとにこの塗装系の各種基本性能に関するデータを収集することとした。平成 25 年度は表 - 1 の中から、鋼道路橋塗装の最も重要な性能の一つである、「防食性」「耐候性」について主に検討した。

表 - 1 鋼道路橋塗装の主な要求性能と性能評価項目

鋼道路橋塗装に求められる性能 (要求性能)	要求性能を確保するために評価すべき項目 (性能評価項目)
● 施工性能 (所定の仕様の塗膜を被塗面に形成できる)	・ 塗料の粘度 ・ 乾燥時間/可使時間/指触乾燥性 ・ 厚塗り性/たるみ性/塗膜の初期外観
● 付着性能 (鋼材や他層塗膜との一体性)	・ 付着性 ・ 耐屈曲性/耐衝撃性/耐摩耗性 ・ 母材への追従性
● 防食性能 (腐食による鋼材の板厚減を生じさせない)	・ 水蒸気透過性/酸素透過性 ・ 耐塩水性 ・ 防食性(キズ部からの錆の広がりにくさ、塗膜下腐食の起きにくさ)
● 景観性能 (構造物の景観と美観)	・ 隠ぺい力/鏡面光沢度(60°) ・ 耐汚染性 ・ 養生時の耐水(結露)性
● 耐久性能 (本来の性能を長期にわたって維持できる)	・ 耐候性 ・ 耐熱性/耐水性/耐塩性 ・ 耐熱熱繰り返し性
● 環境性能(周辺環境や大気への負荷)	・ 二酸化炭素排出量/VOC排出量

表 - 2 鋼道路橋塗装・防食便覧で規定されている一般外面用の新設塗装仕様(C-5 塗装系)

塗装工程		塗料（工程）名	使用量(g/m ²)	目標膜厚(μm)	個別の塗料に対する現行の品質規格
製鋼工場	素地調整	(ブラスト処理 ISO Sa2 1/2)			－
	プライマー	無機ジンクリッチプライマー	160	(15)	JIS K 5552: 2010 ジンクリッチプライマー（１種）
橋梁製作工場	2次素地調整	(ブラスト処理 ISO Sa2 1/2)			－
	防食下地	無機ジンクリッチペイント	600	75	JIS K 5553: 2010 厚膜形ジンクリッチペイント（１種）
	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160	－	JIS K 5551: 2008 構造物用さび止めペイント（Ｂ種）
	下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540	120	JIS K 5551: 2008 構造物用さび止めペイント（Ｂ種）
	中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170	30	JIS K 5659: 2008 鋼構造物用耐候性塗料（中塗り塗料）
	上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140	25	JIS K 5659: 2008 鋼構造物用耐候性塗料（１級）

注)1 使用量はスプレーの場合を示す。

注)2 プライマーの膜厚は総合膜厚に加えない。

注)3 隠ぺい力が劣る有機着色顔料を使用した塗色の上塗りは2回以上塗装する必要がある。

4. 各種塗料・塗装系の性能評価試験

4.1 概要

塗膜の防食性や耐候性を評価する試験方法は様々あり、これらを組み合わせた試験方法なども提案されている。中でも屋外暴露試験は信頼性が高い試験方法として広く利用されているが、地域環境の差の影響を受けることもあり、試験期間と塗膜の変状とから、あらゆる塗料に共通して適用できる性能水準を精度よく規定することは難しい。その一方で、各種の促進劣化試験は、実験室内において制御された環境と、共通の試験条件下で材料劣化を評価できる利点がある。しかしながら、従来の試験は主に塗料どうしの相対評価のために利用されている場合が多く、異なる種類の塗料に共通して適用でき、それらの性能を的確に評価できる基準値が明確に示されていない。塗料の性能規定化にあたっては、塗装系(複層塗膜)にも適用できる試験方法・条件を確立するとともに、その性能水準を規定するための試験データの蓄積が必須である。

4.2 複合サイクル腐食試験

4.2.1 複合サイクル腐食試験の概要

主に大気環境における鋼材の腐食を促進的に再現する試験方法として、塩水噴霧、乾燥、湿潤などの環境条件をサイクルで組み合わせた「複合サイクル腐食試験」がある(図 - 6)。この試験方法は、塗膜の防食性を評価する目的でも広く利用されている。複合サイクル腐食試験の国際的な規格としては ISO 11997-1: 2005(塩水噴霧、湿潤・乾燥の組み合わせ)、および ISO 11997-2: 2000(塩水噴霧、湿潤・乾燥、紫外線照射の組み合わせ)等^{2), 3)}があり、わが国でも ISO 11997-1: 2005 をもとに 2006 年に JIS 化された⁴⁾。

鋼道路橋塗装の現行の品質規格においては、表-3に示す「鉛・クロムフリーさび止めペイント」や「エポキシ樹脂塗料下塗り」等、主に下塗り塗料の防食性の基準として、JIS K 5600-7-9 附属書1 サイクルD (図-2左)に基づく試験・評価方法が規定されている^{5), 6)}。その一方で、下塗りから上塗りまでの塗装系(複層塗膜)全体としての性能基準は定められておらず、これを確立する必要がある。



図-1 複合サイクル試験機によるサイクル腐食試験

表-3 下塗り塗料の品質規格における防食性に関する基準

JIS K 5674 「鉛・クロムフリーさび止めペイント」(1種)	JIS K 5551 「構造物用さび止めペイント」(B種)
JIS K 5600-7-9 附属書1 (サイクルD) ⇒ 36 サイクル後	JIS K 5600-7-9 附属書1 (サイクルD) ⇒ 120 サイクル後
・塗膜外観: さび、膨れ、はがれがないこと	・塗膜外観: さび、膨れ、割れおよびはがれがないこと

塩水噴霧5%NaCl 30±2℃×0.5時間 ↓ 湿潤95±3%RH 30±2℃×1.5時間 ↓ 乾燥50±2℃×2時間 ↓ 乾燥30±2℃×2時間 ● JIS K 5600-7-9 附属書1 (サイクルD) ⇒ 1サイクルあたり6時間	湿潤95%RH 30℃×1時間 ↓ 塩水噴霧5%NaCl 30℃×2時間 ↓ 乾燥20%RH 50℃×1.5時間 ↓ 湿潤95%RH 50℃×1.5時間 ↓ 乾燥20%RH 50℃×1.5時間 ↓ 乾燥20%RH 30℃×1.5時間 ● 土木研究所式複合環境腐食促進試験 ⇒ 1サイクルあたり24時間
--	--

6回の繰り返し

図-2 複合サイクル腐食試験条件(1サイクルあたり)

複合サイクル腐食試験の試験条件には、各機関より様々なものが提案されている。土木研究所においても独自の調査研究により、道路橋の実環境に近く屋外暴露試験と相関がより高いと考えられる促進劣化試験の探索を行い、ISOやJISとは異なる試験条件を提案している(図-2右)。本研究では、JIS式(JIS K 5600-7-9

附属書1(サイクルD))と土木研究所式の双方で各種塗膜の試験評価を行い、結果を比較することとした。

4.2.2 実験方法

試験片(150×70×3.2mm)の基材には、SS400鋼板(JIS G 3101)の表面をブラスト処理(除せいで度:ISO 8501-1 Sa2 1/2、表面粗さ:50μmRzjis相当)したものを用いた。この鋼板に、表-2の塗装系(メーカーの異なる4種)を各層とも規定膜厚となるようにスプレー塗装して試験片を作製した。上塗り塗料の色相は白(マンセル値はN9.5相当)とした。比較のため、鋼道路橋塗装・防食便覧のRc-I塗装系(有機ジンクリッチペイント75μm/弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗り120μm/弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗り30μm/弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗り25μm、メーカーの異なる2種)についても同様の試験を行った。

試験片の塗膜には、鋼素地に達するキズ(長さ50mm)を入れ、土木研究所式あるいはJIS式の試験条件で促進的に劣化させた。所定の試験時間が経過した時点で試験片を取り出して、JIS K 5600:1999や塗膜の評価基準((財)日本塗料検査協会)、鋼構造物塗膜調査マニュアル((社)日本鋼構造協会)等を参考に、塗膜外観観察(さび、はがれ、割れ、膨れ、白亜化等)、キズ部からの錆や膨れの幅の計測、塗膜付着性の評価(プルオフ法)などを行った(図-3)。



図-3 複合サイクル腐食試験における評価方法の一例

4.2.3 実験結果

複合サイクル腐食試験における塗膜外観およびキズ部からの膨れ幅の評価結果の一部を表-4(土木研究所式)および表-5(JIS式)に示す。結果は3枚の試験片の平均値を示しており、いずれも250日後までの結果を示している。

表 - 4 複合サイクル腐食試験における塗膜の評価結果 (土木研究所式)

供試塗料	塗装系	50 サイクル		100 サイクル		150 サイクル		200 サイクル		250 サイクル	
		一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)
A	C-5	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	3
B	C-5	異常なし	0.5	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	3	異常なし	4
C	C-5	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0
D	C-5	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	4
比較A	Rc-I	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	4	異常なし	5
比較B	Rc-I	異常なし	3.5	異常なし	6	異常なし	6	異常なし	6	異常なし	6.5

表 - 5 複合サイクル腐食試験における塗膜の評価結果 (J I S式)

供試塗料	塗装系	200 サイクル		400 サイクル		600 サイクル		800 サイクル		1000 サイクル	
		一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)	一般部	キズ部からの膨れ幅 (mm)
A	C-5	異常なし	0	異常なし	2	異常なし	3	異常なし	3	異常なし	3
B	C-5	異常なし	1	異常なし	1	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	4
C	C-5	異常なし	2	異常なし	4	異常なし	4	異常なし	4	異常なし	4
D	C-5	異常なし	1	異常なし	1	異常なし	1	異常なし	2	異常なし	3
比較A	Rc-I	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	0	異常なし	2	異常なし	4
比較B	Rc-I	異常なし	1.5	異常なし	2	異常なし	3	異常なし	4	異常なし	4

土木研究所式 250 サイクル後、J I S式 1000 サイクル後ともに、すべての試験片で一般部にさび、膨れ、われ等の塗膜外観の異状は認められず、良好な塗膜状態であった。近年、鋼道路橋塗装に用いられている重防食塗装系塗膜は優れた環境遮断性を有している上に、防食下地としてジンクリッチペイントが適用されているため、試験片の一般部に塗膜異状が起きにくく、250 日間程度の試験時間では、一般部の塗膜異状の有無のみで防食性の良否を判断することは不適切と考えられる。一方、塗膜に導入したキズ部からの膨れ(塗膜下腐食による)幅は、いずれの供試塗膜においても、試験サイクルの増加とともに大きくなる傾向となった。土研式と J I S式とでは、250 日間の試験結果に明確な差異はなかった。C-5 塗装系と、Rc-I 塗装系とを比較すると、土研式の 250 サイクルにおいて、Rc-I 塗装系の方がキズ部からの膨れ幅がわずかに大きくなった。これは、C-5 塗装系の防食下地である無機ジンクリッチペイントと、Rc-I 塗装系の有機ジンクリッチペイントとの性能差であると考えられ、既往の研究結果等とも傾向が一致している。

表-6 に複合サイクル腐食試験後に実施した、塗膜付着

表 - 6 複合サイクル腐食試験後の塗膜付着力試験結果

供試塗料	塗装系	土研式 250 サイクル		JIS 式 1000 サイクル	
		付着力 (MPa)	はく離箇所: 面積率 (%)	付着力 (MPa)	はく離箇所: 面積率 (%)
A	C-5	3.1	接着剤: 100	3.2	下塗: 80 接着剤: 15 ジンク: 5
B	C-5	1.5	ジンク: 100	1.5	ジンク: 100
C	C-5	1.8	接着剤: 100	3.3	ジンク: 90 接着剤: 10
D	C-5	3.0	ジンク: 100	3.2	ジンク: 100
比較A	C-5	2.8	接着剤: 45 ジンク: 55	2.8	ジンク: 85 ジンク/下塗: 15
比較B	C-5	0.5	ジンク: 100	1.0	素地: 100

はく離箇所の凡例

接着剤: 接着剤/塗膜界面での破壊

ジンク: ジンクリッチペイント層内での凝集破壊

下塗: 下塗り層内での凝集破壊

ジンク/下塗: ジンクリッチペイントと下塗りとの層間剥離

力試験の結果を示す。キズ部の膨れ幅と付着力とで明確な相関は認められないが、キズ部の膨れ幅が最も大きかった比較Bの塗膜付着力は、土研式試験後、J I S式試験後ともに1.0 MPa以下となり、低い値となった。

土研式250サイクル、J I S式1000サイクルまでの結果から判断すると、複層塗膜の防食性の基準としては、①一般部にはさび、膨れ、割れ、はがれ等の塗膜異状がないこと、②キズ部からの膨れ幅は5mm程度までであること、③塗膜付着力は1.0 MPaより大きいこと、が妥当であると思われる。試験は現在も継続中であり、さらにサイクル数が増えた場合の塗膜劣化挙動や、塗膜の電気的特性等の数値、他の塗装系における試験結果も踏まえた上で、最終的な性能基準値を設定したい。

4. 3 促進耐候性試験

4.3.1 促進耐候性試験の概要

塗膜の耐候性に関する現行の品質基準には、屋外暴露試験によるものと、促進耐候性試験によるものがあるが、いずれも個別（単層）の塗膜を対象とした性能基準となっている。屋外暴露試験による性能基準は、「厚膜形ジンクリッチペイント」「構造物用さび止めペイント」「鋼構造物用耐候性塗料」などのJ I Sで規定されている（表-7）。上塗り塗料は塗装系の中で最外層に適用されるものであり、紫外線や水分等の環境による作用を受けやすい一方で、色彩や光沢といった美観を長期間保持する性能が求められる。このため、上塗り塗料の品質規格であるJIS K 5659では耐候性に関する性能基準が特に重視されており、「さび」「割れ」「はがれ」「膨れ」といった塗膜外観のみならず、「色の変化」「白亜化」「光沢保持率」という美観に関わる評価項目も規定されている。さらに、屋外暴露試験に加えて、促進耐候性試験による評価基準も設定されている。

促進耐候性試験は塗膜を劣化させる紫外線、水、熱などの要因を、屋外暴露で塗膜が受けるよりも高いレベルで塗膜に作用させ、促進的に塗膜を劣化させる試験である。塗料に関するJISで規定されている促進耐候性試験にはキセノンランプ法⁷⁾と紫外線蛍光ランプ法⁸⁾があるが、このうちキセノンランプ法は光源として太陽光と近

似した分光エネルギー分布を持つキセノンアークランプを用いるため、塗膜劣化の進行が屋外暴露に近い経過をとるといった特長が知られている⁹⁾。JIS K 5659ではキセノンランプ法による評価方法が規定されており、表-8に示す評価基準が定められている。

表-8 上塗り塗料の品質規格における促進耐候性に関する基準の例

JIS K 5659「鋼構造物用耐候性塗料」(1級)
照射時間 2000 時間後
・塗膜外観：割れ・はがれ及び膨れがないこと
・色の変化：見本品と比べて大きくないこと
・白亜化：等級が1又は0
・光沢保持率が80%以上

本研究では、上塗り塗料の現行の品質規格における促進耐候性による評価方法を基本とし、JIS K 5600-7-7に準拠した促進耐候性試験により複層塗膜の性能評価を実施することとした。なお、促進耐候性試験の国際規格としてはISO 11341があるが、技術的内容および構成はJIS K 5600-7-7:2008と同じである。

4.3.2 実験方法

試験片(150×70×1.6mm)の基材には、SS400鋼板(JIS G 3101)の表面をブラスト処理(除せいで:ISO 8501-1 Sa2 1/2、表面粗さ:50 μmRzjis 相当)したものを用いた。この鋼板に、表-9(メーカーの異なる4種類)の塗装系を各層とも規定膜厚となるようにスプレー塗装して試験片を作製した。比較のため、C-5塗装系の中塗り/上塗りを、シリコン変性アクリル樹脂塗料用中塗り/シリコン変性アクリル樹脂塗料上塗りに替えた塗装系、ポリウレタン樹脂塗料用中塗り/ポリウレタン樹脂塗料上塗りに替えた塗装系についても同様に評価した。

上塗り塗料の色相は、C-5塗装系については4種類(白、灰(淡彩)、赤(濃彩)、青(中彩):マンセル値はそれぞれN9.5、N7.5、5R4/12、10B6/6相当)、比較の塗装系については3種類(灰、赤、青)とした。これらの試験片を図-4に示すキセノンアークランプ式耐候性試験機(スガ試験機:X-75)で促進的に劣化させ、塗膜の光沢度、色差、膜厚等の経時変化を調べた。

表-7 各種塗料の品質規格における屋外暴露耐候性に関する基準

JIS K 5553「厚膜形ジンクリッチペイント」	JIS K 5551「構造物用さび止めペイント」	JIS K 5659「鋼構造物用耐候性塗料」(1級)
2年間の屋外暴露後 ・塗膜外観：さび、割れ、はがれ及び膨れがないこと	2年間の屋外暴露後 ・塗膜外観：さび、割れ、はがれ及び膨れがないこと	2年間の屋外暴露後 ・塗膜外観：さび、割れ、はがれ及び膨れがないこと ・色の変化：見本品と比べて大きくないこと ・白亜化：等級が1又は0 ・光沢保持率：60%以上

表 - 9 促進耐候性試験に供した塗装系

No.	塗装系	第1層目	第2層目	第3層目	第4層目	第5層目	上塗り塗料の色相
1	C-5 (基本)	無機ジンクリッチ ペイント(75 μ m)	ミストコート (-)	エポキシ樹脂塗料 下塗(120 μ m)	ふっ素樹脂塗料用 中塗(30 μ m)	ふっ素樹脂塗料 上塗(25 μ m)	白(N9.5) 灰(N7.5) 赤(5R4/12) 青(10B6/6)
2	C-5 塗装系の中/上塗りを 替えた塗装系 (比較)				シリコン変性 アクリル樹脂塗料用 中塗(30 μ m)	シリコン変性 アクリル樹脂塗料 上塗(25 μ m)	灰(N7.5) 赤(5R4/12) 青(10B6/6)
3	C-5 塗装系の中/上塗りを 替えた塗装系 (比較)				ポリウレタン樹脂 塗料用中塗(30 μ m)	ポリウレタン樹脂 塗料上塗(25 μ m)	

ブラックパネル温度 : 63℃
 試験槽内湿度 : 50%RH
 スプレー : 18 分/120 分中
 試料面放射照度 : 60 W/m² (at 300~400 nm)



図 - 4 キセノンアークランプ式促進耐候性試験機

促進耐候性試験の条件は、JIS K 5600-7-7:2008 塗料一般試験方法 - 第7部:塗膜の長期耐久性 - 第7節:促進耐候性及び促進耐光性(キセノンランプ法)のサイクルAに準じた(図 - 4)。所定の試験時間が経過した時点で試験片を取り出し、JIS K 5600:1999 や塗膜の評価基準(財)日本塗料検査協会¹⁰⁾、鋼構造物塗膜調査マニュアル(社)日本鋼構造協会¹¹⁾等を参考に、塗膜の外観観察(さび、はがれ、割れ、膨れ、白亜化等)を行うほか、光沢度(20°、60°)、色差、膜厚等の計器測定を実施した。また、塗膜の表面近傍における塗膜構成成分の化学構造の変化を把握するために、赤外顕微鏡を用いた全反射減衰(Attenuated Total Reflection, ATR)法により赤外分光分析を行った。

4.3.3 実験結果

促進耐候性試験におけるC-5塗装系塗膜(白)表面の光沢保持率(初期値を100としたときの割合)の経時変化を図 - 5に示す。これまでにA社品は4000時間まで、B、C、D社品は2000時間までのデータが得られている。

塗料を供出したメーカーの違いにより結果に若干の差異が生じたが、2000時間経過後の光沢保持率はいずれも

90~100%の範囲内であり、塗膜外観に異状は見られなかった。試験前および4000時間の試験後におけるC-5塗装系(A社品、上塗り塗膜:白色)塗膜表面の赤外吸収スペクトルの変化を図 - 6に示す。促進耐候性試験により、塗膜表面ではヒドロキシル基や過酸化エステル基の増加、アルキル基の減少など樹脂の酸化反応に起因する変化のみならず、ウレタン基の減少など、樹脂の分解反応が生じていることを示唆する変化が認められた。

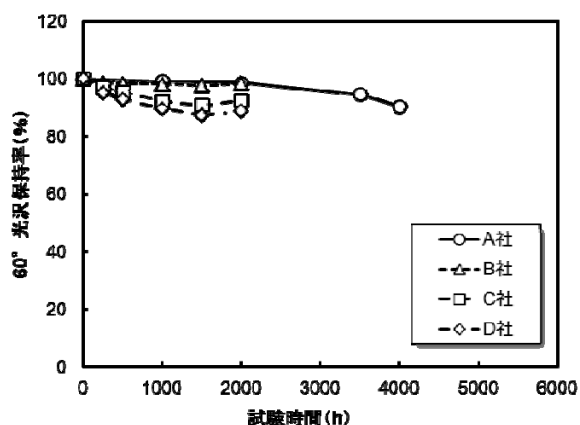


図 - 5 促進耐候性試験におけるC-5塗装系塗膜(白)の光沢保持率の経時変化

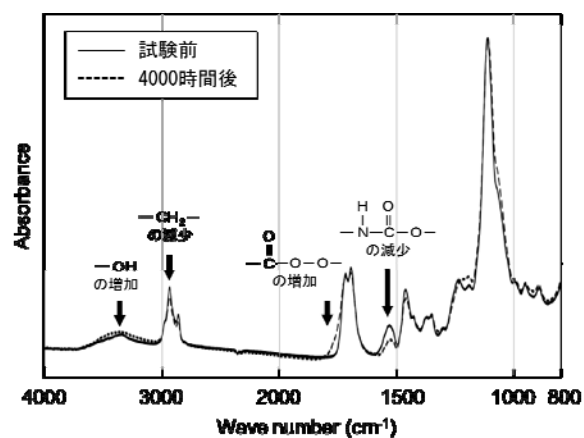


図 - 6 C-5塗装系(A社品)塗膜表面の赤外吸収スペクトルの変化

図 - 6 における赤外吸収スペクトルの変化と同様の傾向は、過去に同系の塗膜について実施した屋外暴露試験においても得られている。そこで、同系の塗膜の劣化過程において変化が顕在化すると思われる 1540cm^{-1} 付近の吸収ピークに着目し、 1730cm^{-1} 付近の吸収ピーク強度を基準とした吸光度比を比較した (図 - 7)。

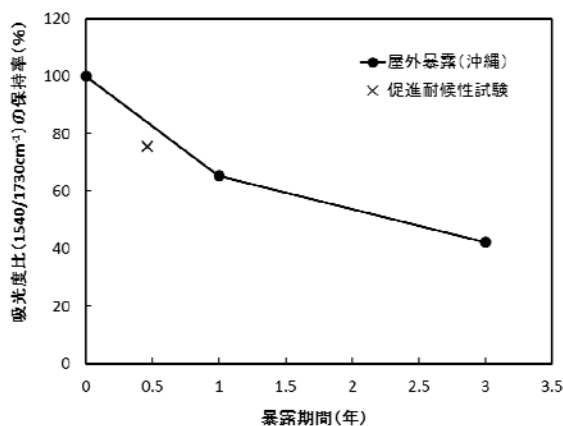


図 - 7 屋外暴露試験における C-5 塗装系 (A 社品) 塗膜の吸光度比 ($1540\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$) の低下

図の縦軸は、試験前の塗膜の赤外吸収スペクトルにおける吸光度比 ($1540\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$) に対する、各時間における吸光度比の百分率を示している。この結果から、暴露による樹脂の分解反応の進行程度から見ると、今回の促進耐候性試験は沖縄における暴露試験の 1.5 倍程度の促進性があるものと思われる。

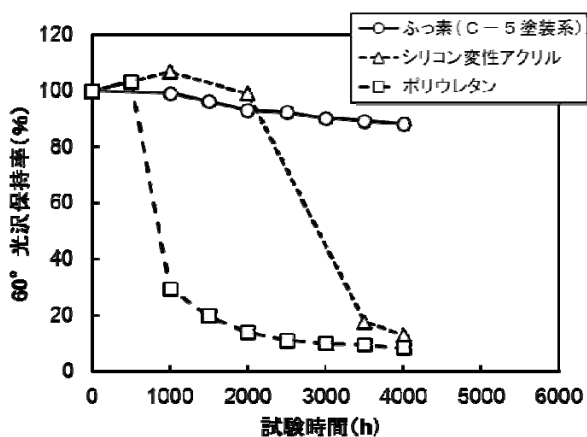


図 - 8 上塗り塗膜の違いによる光沢保持率の経時変化 (A 社品)

異なる上塗り塗料 (白) を適用した塗装系における、光沢保持率の経時変化を図 - 8 に示す。ふっ素樹脂塗料を上塗りとして適用した塗装系では、4000 時間後におい

ても初期の 90% 程度の光沢を保持していたが、シリコン変性アクリル樹脂塗料では 2000 時間程度から、ポリウレタン樹脂塗料では 500 時間程度から、急激に光沢が低下することがわかった。表 - 8 に示した現行の品質基準では、2000 時間後の塗膜性状によって合否判定が行われている。図 - 8 において 2000 時間後の光沢保持率に着目すると、ふっ素樹脂塗料およびシリコン変性アクリル樹脂塗料の光沢保持率は 90~100% となっており、いずれも「合格」と判定される。しかしながら、より長時間の促進耐候性試験を実施することにより、両者の耐候性の差異が顕著に表れることがわかった。

C-5 塗装系における上塗り塗膜の色相 (灰、赤、青) による光沢保持率および色差 (ΔE^*_{ab}) の経時変化の違いを、それぞれ図 - 9、10 に示す。参考として、白色試験片のデータも記している。光沢度、色差ともに試験片表面の 3 点を測定し、平均値として整理した。

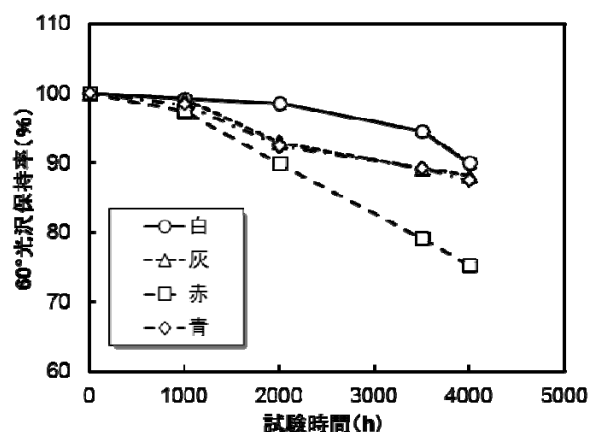


図 - 9 促進耐候性試験における C-5 塗装系塗膜の光沢保持率の経時変化 (白: A 社品、灰、赤、青: E 社品)

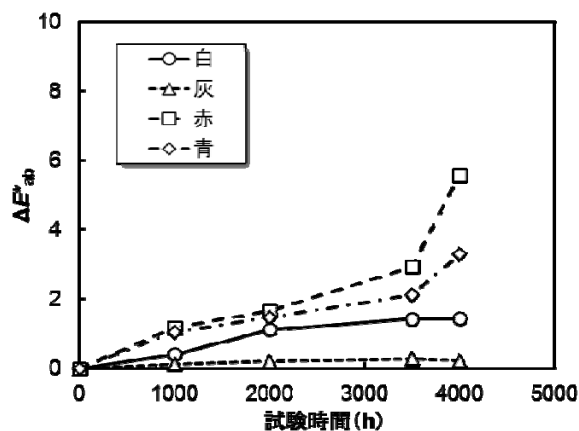


図 - 10 促進耐候性試験における C-5 塗装系塗膜の色差 (ΔE^*_{ab}) の経時変化 (白: A 社品、灰、赤、青: E 社品)

促進耐候性光沢度、色差ともに、塗膜の色相によって異なる変化の挙動を示した。4000 時間後のデータを比較すると、白色、灰色、青色の塗膜の光沢保持率がほぼ同等で 90%程度であるのに対し、赤色は最も低く 75%程度となった。一方、色差では灰色塗膜の変化はほとんどなく、次いで白色、青色、赤色の順に変化は大きくなった。

図 - 11 に、灰、赤、青色塗膜の膜厚減少量の経時変化を示す。膜厚は、電磁式膜厚計により試験片表面の任意の 49 点を測定した値の平均値とした。光沢、色差の変化では赤色塗膜が大きな変化を示した一方で、膜厚の減少は灰色塗膜が他を上回る結果となった。膜厚の減少は図 - 6 で示したような樹脂の分解反応に起因し、塗膜が徐々に消耗しているものと考えられるが、図 - 11 の結果から、この消耗速度が塗膜の色相によって異なることが示唆される。紫外線照射環境による光沢や色彩の変化は、塗膜の美観・景観機能に影響し、膜厚の減少は塗膜の環境遮断機能、ひいては防食機能に影響するものと考えられる。同種の樹脂を用いて同じ方法で試験した場合でも、色相や着色顔料等の違いにより異なる結果となる可能性があることが分かった。

なお、一般には同じ色相の塗料を調合する場合でも、塗料メーカーによって、用いる顔料の種類や配合量は異なっている。そのため、塗料の種類や色相が同じであっても、劣化の挙動は若干異なる可能性がある。色相による劣化挙動の違いについては引き続き検討中であり、それらの結果や、他の塗装系における試験結果も踏まえた上で、最終的な性能基準値を設定したい。

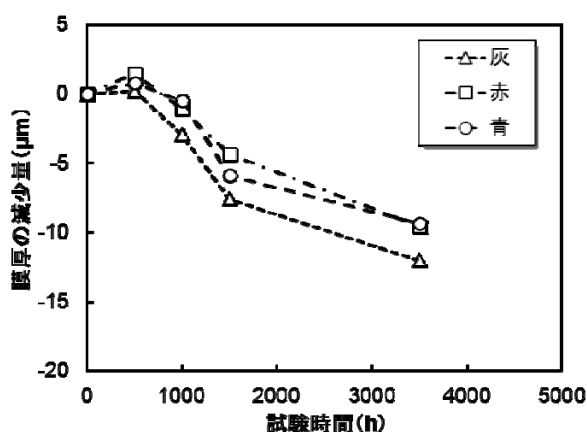


図 - 11 促進耐候性試験における C-5 塗装系塗膜 (E 社品) の膜厚減少量の経時変化

図 - 8～11 の結果から判断すると、各種塗膜の耐候性をキセノンランプ法による促進耐候性試験で評価するた

めには、現行の品質規格等で規定されているよりも長期の試験時間が望ましく、少なくとも 4000 時間程度は実施することが望ましいと言える。

5. まとめ

本研究では、塗装設計基準の性能規定化において参考となる基礎的な技術資料の作成をめざし、鋼橋防食のために塗料・塗装が備えるべき諸性能・機能について明らかにするとともに、これらを的確に評価できる試験評価技術の確立に取り組んでいる。

平成 25 年度は、過年度に設定した性能評価項目に対する試験評価方法および性能基準値に関する検討の一部として、主に塗膜の防食性および耐候性に関する試験・評価を実施した。鋼道路橋塗装・防食便覧に規定されている新設用塗装系 (C-5 塗装系) を標準塗装系と位置付け、複合サイクル腐食試験や促進耐候性試験 (キセノンランプ法) 等の促進劣化試験を実施し、促進劣化試験前後における塗膜外観、光沢・色彩、切り込み傷からの発錆状況、塗膜付着力、塗膜の電気的特性等のデータを収集した。

今後はさらに多くの塗装系および性能評価項目についてデータを収集するとともに、これらのデータに基づき、試験評価方法および性能基準値について検討していく予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、平成 17 年 12 月
- 2) ISO 11997-1:1998, Paints and varnishes-Determination of resistance to cyclic corrosion conditions-Part 1: Wet (salt fog)/dry/humidity (MOD)
- 3) ISO 11997-2: 2000 Paints and varnishes-Determination of resistance to cyclic corrosion conditions-Part 2: Wet (salt fog)/dry/humidity/UV light
- 4) JIS K 5600-7-9: 2006 塗料一般試験方法-第 7 部：塗膜の長期耐久性-第 9 節：サイクル腐食試験方法-塩水噴霧/乾燥/湿潤
- 5) JIS K 5674: 2003 鉛・クロムフリーさび止めペイント
- 6) JIS K 5551: 2008 構造物用さび止めペイント
- 7) JIS K 5600-7-7: 2008 塗料一般試験方法-第 7 部：塗膜の長期耐久性-第 7 節：促進耐候性及び促進耐光性 (キセノンランプ法)
- 8) JIS K 5600-7-8: 1999 塗料一般試験方法-第 7 部：塗膜の長期耐久性-第 8 節：促進耐候性 (紫外線蛍光ランプ法)

- 9) 飯田眞司、高柳弘道、矢部政実：促進耐候性試験法、塗料の研究、第145号、pp. 22-37、平成18年3月
- 10) (財) 日本塗料検査協会：塗膜の評価基準、平成15年
- 11) (社) 日本鋼構造協会：鋼構造物塗膜調査マニュアル、平成18年10月

A STUDY ON PERFORMANCE EVALUATION OF PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL BRIDGES

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Materials and Resources Research
Group (Advanced Materials)

Author : NISHIZAKI Itaru

TOMIYAMA Tomonori

Abstract : The aim of this study is to obtain technical data on performance evaluation method for steel bridge coatings in order to formulate specific safety guidelines for the coatings. Based on the findings in fiscal year 2011 and 2012, we examined corrosion protection properties and weathering behavior of coating films this year. Coating system "C-5" which are provided as standard coating systems for Japanese steel road bridges in the Coating Handbook edited by Japan Road Association was picked up as experimental objects. The test pieces coated with C-5 system were subjected to accelerated weathering tests (under xenon-arc radiation) and cyclic corrosion tests (salt fog/dry/humidity). The basic data for C-5 system such as appearance, glossiness, color difference, rust formation, adhesion, impedance and so on were corrected.

Key words : steel bridge coatings, coating materials, coating system, specific safety guidelines