

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 26 年度は、鋼道路橋防食便覧に規定されている新設用塗装系（C-5 塗装系）の促進耐候性試験（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過年度に引き続き実施し、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充実させるとともに、付着性能、施工性能等に関する各種試験方法による試験を実施し、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 26 年度は、鋼道路橋防食便覧に規定されている新設用塗装系（C-5 塗装系）の促進耐候性試験（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過年度に引き続き実施し、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充実させるとともに、付着性能、施工性能等に関する各種試験方法による試験を実施し、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、「鋼道路橋防食便覧」（日本道路協会、平成 26 年 3 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を目標としている。そのために、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 26 年度は「防食性」「耐候性」「付着性」「施工性」等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)	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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 (本来の性能を長期にわたって維持できる)	<ul style="list-style-type: none"> 耐候性 耐熱性/耐水性/耐湿性 耐冷熱繰り返し性
● 環境性能(周辺環境や大気への負荷)	<ul style="list-style-type: none"> 二酸化炭素排出量/VOC排出量

4. 塗膜の防食性・耐候性に関する性能評価試験

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⁾。

表 - 2 鋼道路橋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。

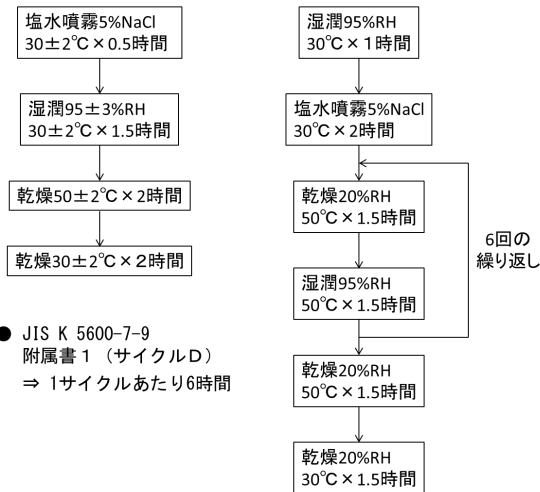
鋼道路橋塗装の現行の品質規格においては、表-3に示す「鉛・クロムフリーさび止めペイント」や「エポキシ樹脂塗料下塗り」等、主に下塗り塗料の防食性の基準として、JIS K 5600-7-9 附属書1 サイクルD (図-2左)に基づく試験・評価方法が規定されている^{5), 6)}。その一方で、下塗りから上塗りまでの塗装系(複層塗膜)全体としての性能基準は定められておらず、これを確立する必要がある。



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



● 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

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)の表面をプラスト処理(除せいで: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)。

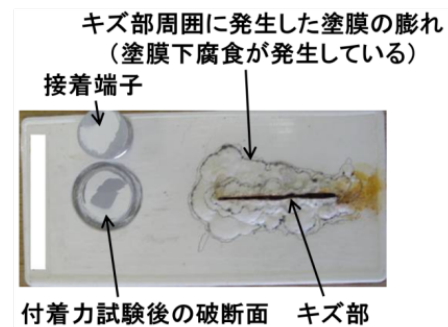


図-3 複合サイクル腐食試験における評価方法の一例

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400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		200 サイクル		300 サイクル		400 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	3	異常なし	4
B	C-5	異常なし	0.5	異常なし	2	異常なし	3	異常なし	4	異常なし	4.2
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	0.5
D	C-5	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 A	Rc-I	異常なし	2	異常なし	2	異常なし	4	異常なし	6.5	異常なし	12
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	10.5	異常なし	15

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		1600 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	4
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	5
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	10.5
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	12

土木研究所式 400 サイクル後、J I S式 1600 サイクル後ともに、すべての試験片で一般部にはさび、膨れ、われ等の塗膜異常は認められず、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常が起きにくいことが考えられる。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り、また、試験片間において差が生じた。C-5 塗装系では、土研式の 400 サイクルにおけるキズ部からの膨れ幅は最大で 5 mm 程度であるのに対し、Rc-I 塗装系では 15 mm 程度となった。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。土研式と J I S式とでは、400 日間の試験結果に明確な差異はなかった。

過去に実施した屋外暴露試験と、複合サイクル腐食試験

(土研式)の結果について、キズ部からの最大膨れ幅に着目し整理した結果を図-4に示す。これによると、複合サイクル腐食試験(土研式)の60サイクルが沖縄における屋外暴露1年程度に相当することがわかる。すなわち、複合サイクル腐食試験(土研式)400サイクルでは、沖縄暴露のおおむね6~7年相当の結果が得られるものと考えられる。

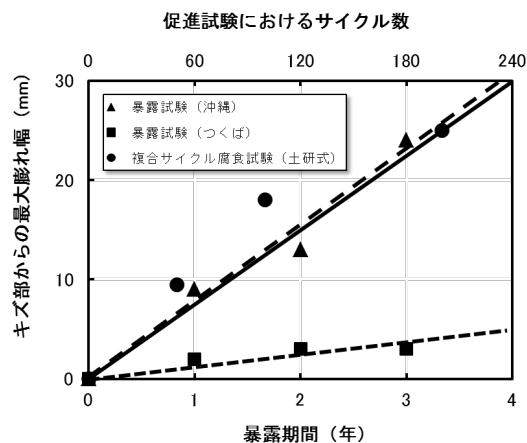


図 - 4 複合サイクル腐食試験 (土研式) と屋外暴露試験との相関

表-6に複合サイクル腐食試験後に実施した、塗膜付着力試験の結果を示す。一部を除き、キズ部からの膨れ幅にかかわらず、いずれも2.0 MPa以上の良好な付着力を示した。一般に重防食塗装系塗膜は一般塗装系に比べて環境遮断性が高いため、付着力の低下を来す塗膜劣化が生じるまでには、より長期の試験が必要になるものと考えられる。

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400サイクル		JIS式1600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	3.5	接着剤:100	4.0	接着剤:100
B	C-5	3.0	ジंक:100	1.5	ジंक:100
C	C-5	2.5	ジंक:100	3.0	ジंक:90 接着剤:10
D	C-5	3.5	ジंक:100	2.0	ジंक:100
比較A	C-5	3.0	接着剤:65 ジंक:35	2.0	ジंक:85 ジंक/下塗:15
比較B	C-5	2.0	ジंक:100	1.0	ジंक:100

はく離箇所の凡例 接着剤: 接着剤/塗膜界面での破壊
 ジंक: ジンクリッチペイント層内の凝集破壊
 下塗: 下塗り層内の凝集破壊
 ジंक/下塗: ジンクリッチペイントと下塗りの層間剥離

4.2.4 基準値の検討

土研式400サイクル、JIS式1600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1.5 MPaより大きいこと、が妥当であると思われる。過去の屋外暴露試験結果によると、土研式400サイクル試験は沖縄暴露における6~7年に相当するものと考えられる。今後、さらにサイクル数を増やし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JISで規定されている(表-8)。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-7に示す評価基準が定められている。

表 - 7 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

表 - 8 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)	青(10B6/6)

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 (150×70×1.6 mm) 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 μ m Rz jis 相当) したものをを用いた。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。

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 - 5)。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。

ブラックパネル温度	: 63°C
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/m ² (at 300~400 nm)



図 - 5 キセノンアークランプ式促進耐候性試験機

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 - 6 に示す。これまでに9000時間までのデータが得られている。

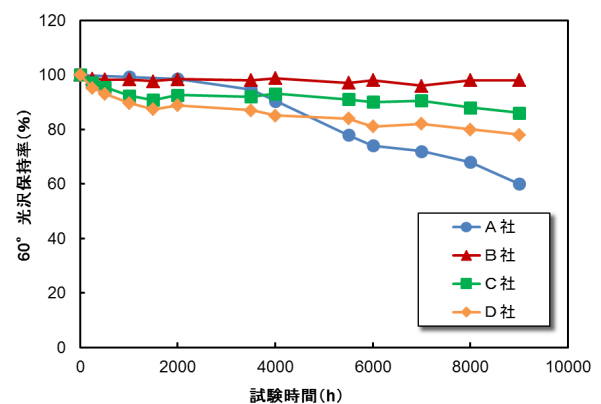


図 - 6 促進耐候性試験におけるC-5 塗装系塗膜 (白) の光沢保持率の経時変化

塗料を供出したメーカーの違いにより結果に差異が生じた。B社品を除いて、いずれもおよそ4000時間経過後より徐々に光沢度が減少した。B社品については9000時間経過後においても、明確な光沢度低下は認められなかった。A社品については変化が最も大きく、9000時間経過時点で初期の60%程度まで光沢度が低下した。C-5塗装系の試験片においては、いずれも9000時間経過時点で、塗膜外観に異状は認められなかった。

異なる上塗り塗料を適用した塗装系における、光沢保持率の経時変化を図-7に示す。結果は各上塗り塗料について、全ての色相における測定値の平均を示している。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。ふっ素樹脂塗料の光沢度は緩やかに低下を示し、9000時間試験後にはおよそ60%の光沢保持率となった。

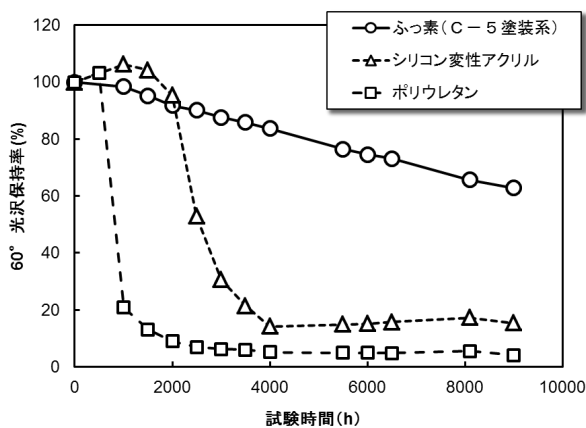


図-7 上塗り塗膜の違いによる光沢保持率の経時変化 (A社品)

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-8、9に示す。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。

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。さらに試験を継続すると、9000時間経過時点で灰、青は当初の80%程度、赤は当初の40%程度まで光沢が低下した。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。一般に ΔE^*_{ab}

が2.0程度より大きくなると肉眼でも色差を認識できるとされているが、促進耐候性試験における赤、青の色の変化は、4000時間以降でこれを上回る大きさとなった。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。

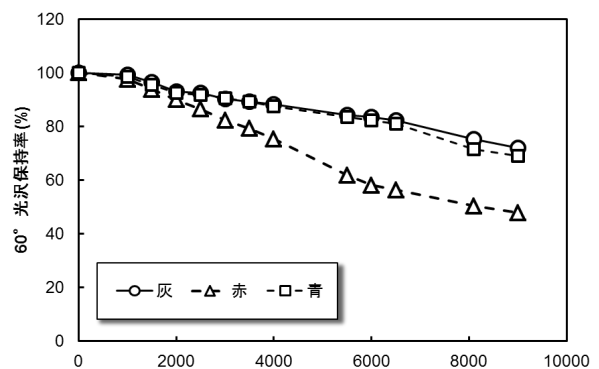


図-8 促進耐候性試験におけるC-5塗装系塗膜の光沢保持率の経時変化 (灰、赤、青: E社品)

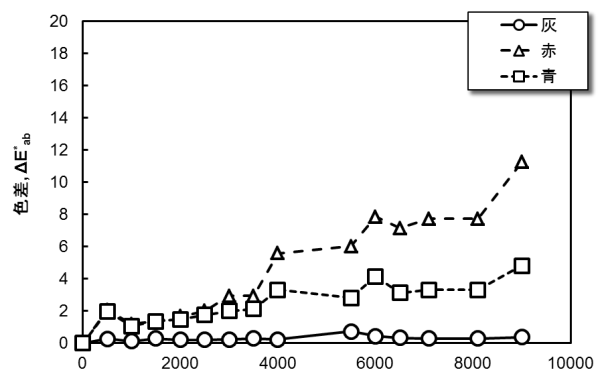


図-9 促進耐候性試験におけるC-5塗装系塗膜の色差 (ΔE^*_{ab}) の経時変化 (灰、赤、青: E社品)

図-10は促進耐候性試験に供した試験片と同じものを屋外暴露 (つくば) したときの、光沢度の変化を示している。ふっ素樹脂塗料およびシリコン変性アクリル樹

脂塗料については2.5年の屋外暴露においても光沢度の低下はほとんど見られなかったが、ポリウレタン樹脂塗料については暴露1.5年頃より急激に光沢が低下し、暴露2.5年では約40%の光沢度保持率となった。そこで、光沢度保持率に着目し、屋外暴露試験と促進耐候性試験との相関について調べた。

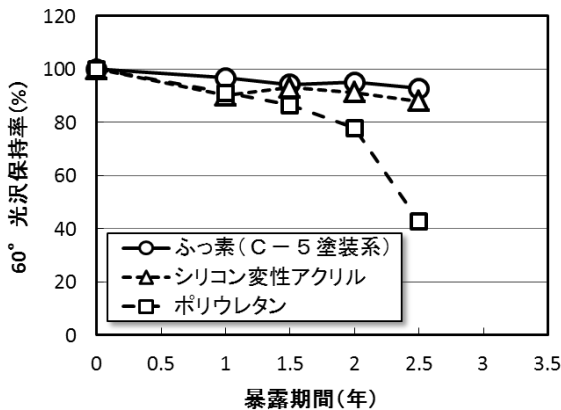


図 - 1 0 屋外暴露試験（つくば）における各塗装系の光沢保持率の変化

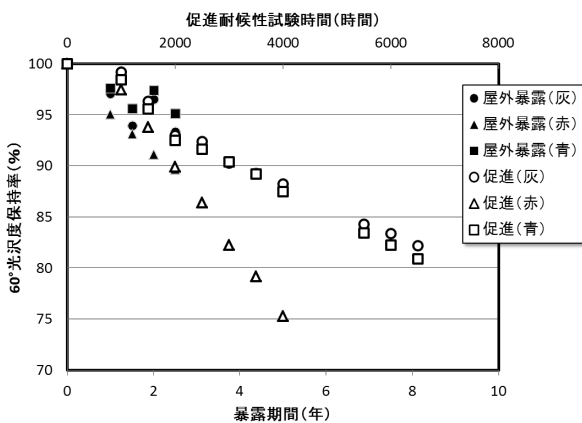


図 - 1 1 屋外暴露試験（つくば）と促進耐候性試験との相関（C-5 塗装系）

C-5 塗装系について、屋外暴露試験および促進耐候性試験における光沢度保持率の変化を同一グラフ上にプロットした結果を図-11に示す。屋外暴露試験と促進耐候性試験との相関は、上塗り塗料の種類や色相によって異なる結果となったが、C-5 塗装系については比較的良好な相関が得られた。この結果から、促進耐候性試験 8000 時間が、おおむね暴露試験（つくば）10 年に相当することがわかった。一方で、沖縄における屋外暴露試験については、いずれの塗装系、色相においても、促

進耐候性試験との相関は希薄であった。このことから、沖縄とつくばとは、屋外暴露による塗膜劣化の機構が異なることが推察される。今後、環境因子の違い等を踏まえ、屋外暴露における塗膜劣化機構について、さらに詳しく検討する必要がある。

4.2.5 基準値の検討

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-7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。図-6~11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ことが明らかとなった。屋外暴露試験結果によると、これはつくばにおける5年間程度の暴露に相当する。地域や色相等による塗膜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。

5. 塗膜の付着性に関する性能評価試験

5.1 概要

塗膜の「付着性能」は、塗膜が鋼材や他層の塗膜と一体化し、安定して付着し続けられる性能である。塗膜付着力が低下することにより、剥離や塗膜下腐食等が引き起こされると考えられたため、一定以上の適切な水準で管理する必要がある。塗膜の付着性能を評価する方法には、クロスカット法とプルオフ法が広く適用されており、これらはそれぞれ JIS K 5600-5-6¹²⁾、JIS K 5600-5-7¹³⁾でその方法が規定されている。一般に、クロスカット法においては塗膜の付着性に加えて靱性（脆性）の評価ができることとされており、プルオフ法では鉛直方向の塗膜付着力を具体的な数値で把握することができるとされている。ここでは、これらの2種類の試験を試み、塗膜の付着性について検討した。

5.2 実験方法

5.2.1 クロスカット法

クロスカット法は、塗膜に基盤目状に鋼素地に達する

キズを入れ、セロハン粘着テープの粘着力を利用して強制的に塗膜を剥離させることにより、塗膜の鋼素地や他層塗膜との付着性を評価するものである。JIS K 5400-8-5 においては、試験対象となる塗膜の厚みに制限は無かったが、JIS K 5600-5-6 では膜厚が $250\ \mu\text{m}$ までの評価しか想定されていない。C-5 塗装系の全膜厚は $250\ \mu\text{m}$ であり、JIS K 5600-5-6 の範囲内である。ここでは格子間隔を JIS K 5600-5-6 に基づく $3\ \text{mm}$ (25 マス)、JIS K 5400-8-5 に基づく $5\ \text{mm}$ (9 マス) の二通りに設定し、試験を行った。JIS に準拠した市販のカッターガイドを用い、手で鋼素地に達するキズを塗膜に施し、所定の格子パターンを作製した。塗膜表面に粘着テープを貼付し、これを塗膜の鉛直方向に勢いよく引き剥がすことで試験を行った。なお、JIS K 5600-5-6 では塗膜面に対し 60° 方向にテープを引き剥がすことが規定されているが、せん断破壊の影響をできるだけ排除し、繰り返しのばらつきをできるだけ小さくするため、JIS K 5400-8-5 で規定される鉛直方向で試験した。試験片 ($70 \times 150 \times 3.2\ \text{mm}$) 1 枚につき、2 箇所ずつ試験を行った。

5.2.2 プルオフ法

プルオフ法は、試験端子を塗膜面に接着剤で接着させ、塗膜が破断するまで端子に垂直引張荷重を与える方法である。塗膜と鋼素地の界面あるいは塗膜層間の最も弱い箇所破断することとなる。塗膜の付着力が塗膜自身の強度を上回る場合には、塗膜内部で凝集破壊が起きる。

JIS K 5600-5-6 に準拠した試験端子および試験器 (アドヒージョンテスター、Elcometer 106) を用いて試験を行った。試験端子を接着させる接着剤には、2 液のエポキシ樹脂系のものを用いた。試験片 ($70 \times 150 \times 3.2\ \text{mm}$) 1 枚につき、3 箇所ずつ試験を行った。

5.3 実験結果

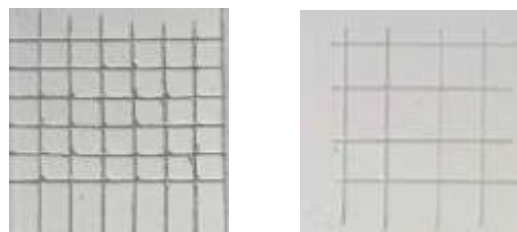
クロスカット法による試験後の塗膜外観の例を図-1 2 に示す。試験を行った全ての試験片において、格子の目に剥離は生じなかった。一方で、カットの縁や交差点において、塗膜剥離を生じた試験片が認められた。カットの縁や交差点における塗膜剥離は、格子間隔が $5\ \text{mm}$ のものよりも、 $3\ \text{mm}$ の方で数多く見られた。そこで、試験に残存している塗膜の面積を下記の方法で評価し、クロスカット法における格子間隔により整理した。

- ① 格子の目に剥離が無く、カットの縁が完全に残っているものを 1 とする。
- ② 格子の目に剥離は無いが、カットの縁あるいは交差

点剥離しているものを 0.8 とする。

③ 格子の目が剥離しているものは、残存塗膜の面積に応じて 0~1 で評価する。

④ 全ての格子 (25 マスあるいは 9 マス) について上記評点の和を求め、全格子数に対する割合を求めて、これを残存面積率とする。



(a) 格子間隔 $3\ \text{mm}$ (25 マス) (b) 格子間隔 $5\ \text{mm}$ (9 マス)

図-1 2 クロスカット法による試験後の塗膜外観

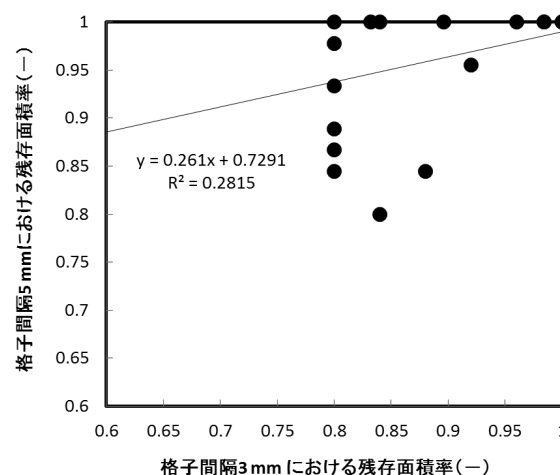


図-1 3 格子間隔による試験結果の相関

図-1 3 に、試験後の塗膜の残存面積率に基づき、格子間隔が $3\ \text{mm}$ と $5\ \text{mm}$ の場合における試験結果の相関について整理した結果を示した。この結果から、両者の相関は希薄であり、全般的に格子間隔 $5\ \text{mm}$ の方が試験後の塗膜残存面積が大きいことが明らかとなった。前述の通り、塗膜剥離を生じたのはいずれもカットの縁や交差点であり、無機ジンクリッチペイント層における凝集破壊が大半であった。無機ジンクリッチペイントはアルキルシリケート等の無機系のバインダに亜鉛粉末が高い含有率で含まれており、他の有機系の塗膜に比べて硬く脆い。そのため、カッターで格子を入れる際に、応力集中部で破損してしまう可能性が、他の塗膜よりも高いものと推察される。格子間隔を小さくするほどその影響は大きくなり、本来の塗膜付着力が反映されない試験結果へと結び

ついたものと考えられる。よって、無機ジンクリッチペイントを用いたC-5塗装系の評価には、JIS K 5400-8-5の試験方法がより適しているものと思われる。

プルオフ法により得られたC-5塗装系の塗膜付着力と、この時の塗膜破壊の形態について整理した結果を図-14に示す。塗膜付着力は0~7.0MPaまで大きくばらつく結果となった。付着力が高いほど接着剤/上塗り塗膜層間での破壊が多くなり、逆に塗膜付着力が低いほどジンクリッチ塗膜層での凝集破壊が多くなる傾向がある。

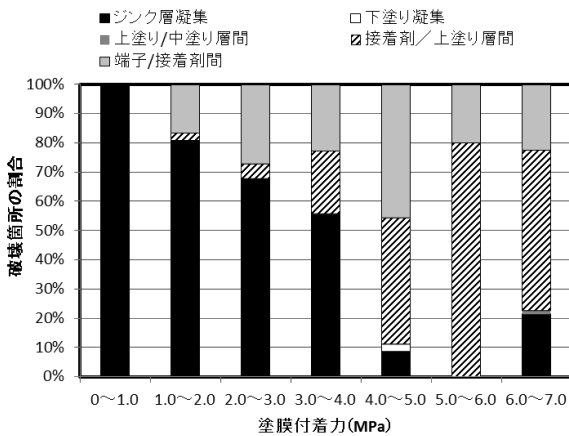


図-14 プルオフ法によるC-5塗装系塗膜の付着力試験結果

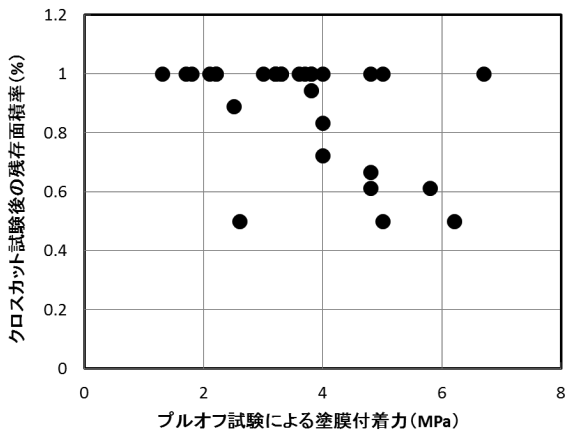


図-15 プルオフ法によるC-5塗装系塗膜の付着力試験結果

プルオフ試験における塗膜付着力と、クロスカット試験後の塗膜残存面積率との関係を求め、図-15に示した。プルオフ法とクロスカット法の試験結果は整合しておらず、プルオフ法で低い付着力を示した場合にも、クロスカットでは「良好な付着性能を有する」と判断される可能性があることが示唆された。プルオフ法で得られた全ての付着力について平均をとると3.7MPaであり、標準偏差は1.5MPa、変動係数は40%となる。一方で、ク

ロスカット法における塗膜残存面積率の平均値は0.96、標準偏差は0.07、変動係数は8%となる。これらのことから、プルオフ法とクロスカット法との相関が低い理由として、プルオフ法の試験結果のばらつきが大きいことが挙げられる。このばらつきは、試験端子の形状や試験器の作動機構に起因し、単純な一軸引張荷重とは別な、せん断方向への荷重等が作用しているためと推察される。これらの荷重の作用により、他よりも力学的性能の劣るジンクリッチ塗膜層が、見かけ上、低い引張荷重で破断したため、図-14のような結果になったものと考えられる。

5.4 基準値の検討

一般に、鋼構造物の防食塗膜の付着力は、1.5MPaや2.0MPaが基準として考えられている。しかし、その明確な根拠は未だ示されていない。現状のプルオフ試験ではばらつきが大きく、適切な基準値を明らかにするためには、今後、試験方法の見直しを行い、精度の高い評価ができるよう改善する必要がある。最近では従来のプルオフ試験におけるばらつきを低減するために、試験端子形状の改良や、試験の自動化などが検討されており¹⁴⁾、これらの新しい手法の妥当性を検証するとともに、促進腐食試験における塗膜付着力の変化等も踏まえた上で、塗膜付着性能の基準値について検討していく予定である。

6. 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26年度は、鋼道路橋防食便覧に規定されている新設用塗装系(C-5塗装系)の促進耐候性試験(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過年度に引き続き実施し、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、塗膜付着力等のデータを充実させるとともに、付着性能や施工性能等に関する各種試験方法による試験を実施し、データを収集した。

今後、膜厚不足等の施工不良を模擬した塗装系や今後の展開が期待される新規塗料を用いた塗装系等の試験データも踏まえ、各性能評価項目における基準値について検討し、最終的な成果を取りまとめる予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、平成 26 年 3 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
- 12) JIS K 5600-5-6: 1999 塗料一般試験方法—第 5 部：塗膜の機械的性質—第 6 節：付着性（クロスカット法）
- 13) JIS K 5600-5-7: 1999 塗料一般試験方法—第 5 部：塗膜の機械的性質—第 7 節：付着性（プルオフ法）
- 14) 三輪貴志、竹下幸俊、阪田春三、澤田 孝：塗膜付着力測定におけるドリー形状の影響及び基盤目試験との相互関係に関する考察、防錆管理、第 58 巻、第 10 号、pp. 368-372、平成 25 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