

鋼構造物塗装の VOC 削減に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、守屋 進、富山 禎仁

【要旨】 無溶剤形塗料は従来の溶剤形塗料に比べて塗装作業性が劣り、河川鋼構造物の現場での塗替塗装に適用することは現状では困難である。このことから、河川鋼構造物塗装の VOC 削減のためには、当面は低溶剤形塗料を適用することが不可欠であることを明らかにした。一方、水性塗料は従来の溶剤形塗料に比べて施工環境の影響を受けやすいなどの欠点があるものの、溶剤形とほぼ同等の塗膜性能を期待できることが明らかとなった。各種塗膜性能試験や施工試験などの結果に基づき、低溶剤形塗料を適用した河川鋼構造物塗装の VOC 削減塗装仕様と水性塗料を適用した鋼道路橋塗装の VOC 削減塗装仕様を提案し、これらの VOC の削減効果を明らかにした。
キーワード：無溶剤形塗料、水性塗料、VOC 削減、鋼構造物、塗装作業性

1. はじめに

光化学オキシダントや浮遊粒子状物質の原因物質の一つである揮発性有機化合物（volatile organic compounds, VOC）は、わが国では年間約 185 万トン（平成 12 年度）排出されている代表的な大気汚染物質である。VOC の排出抑制については、平成 16 年 5 月に改正大気汚染防止法が公布され、法規制と事業者の自主的取組による排出抑制を組み合わせ、効果的な削減を行っていく新たな制度（ベスト・ミックス）が始まった。

河川鋼構造物や鋼道路橋などの土木鋼構造物の代表的な鋼材防食法である塗装は、鋼材の表面に塗料を適用して塗膜を形成させ、鋼材の腐食を促進する要因（酸素や水、塩分など）を遮断することで鋼材を保護することができる。従来の塗料には樹脂や顔料、添加剤などを均一に溶解あるいは分散させるため、また、塗装の際に塗装作業性や乾燥性を調整するために、多くの VOC を含む有機溶剤が使用されている¹⁾。工場内塗装においては、工程や設備の改善による VOC 排出抑制策が期待できるが、その一方で、現場塗装ではこれらの対策は困難であり、塗料に含まれる VOC 量自体を大幅に削減する必要がある。このためには、VOC を主な溶剤として使用する塗料（溶剤形塗料）から、無溶剤形塗料（溶剤を含まない塗料）や水性塗料（水で希釈できる塗料）への転換を図らなければならない。しかしながら、無溶剤形塗料は溶剤形塗料よりも施工性（塗装作業性）に劣り、また水性塗料は防食性に劣る、塗装条件が制約される（乾燥・硬化しにくい）といった欠点が知られており、これまで鋼構造物塗装への適用性は十分に検討されていなかった。

そこで本研究では、土木鋼構造物塗装における VOC の削減を達成するために、無溶剤形塗料の河川鋼構造物塗装への適用と水性塗料の鋼道路橋塗装への適用、さらにはこれらの塗料を適用した際の環境負荷低減性について検討した。なお、本研究は公募に応じた塗料会社 6 社との共同研究により進めた²⁾。

2. 研究の概略

2.1 無溶剤形塗料の河川鋼構造物塗装への適用に関する検討

現状の塗料技術において、溶剤形から無溶剤形への転換の可能性が最も高い塗料は、エポキシ樹脂塗料である。そこで本研究では、無溶剤形エポキシ樹脂塗料を研究の対象とした。

無溶剤形エポキシ樹脂塗料は、低分子量の液状エポキシ樹脂を配合した塗料液と、低分子量アミンを配合した硬化剤との硬化反応によって塗膜を形成する塗料である³⁾。高分子量の樹脂を有機溶剤に溶かした塗料液を用いる溶剤形エポキシ樹脂塗料と異なり、樹脂そのものが低分子量（すなわち液状）であることから見かけの乾燥が遅く、特に低温ではその傾向が顕著である。また、低分子量の樹脂同士の反応であることから反応熱が大きく、これによって常温以上の硬化反応では急激に反応が進むことで粘度が上昇するため、塗料液と硬化剤とを混合してからの塗装可能時間（可使時間）が短い。さらに、液状エポキシ樹脂は粘度の温度依存性が大きく、低温での粘度上昇が大きいことも特徴として挙げられる。このように無溶剤形エポキシ樹脂塗料は溶剤形エポキシ樹脂塗料と比べ、施工や塗料の取り扱いにおいて管理すべき点が多い。

したがって本研究ではまず、無溶剤形エポキシ樹脂塗料の施工性について評価した。その上で、従来の溶剤形エポキシ樹脂塗料を無溶剤形に置き換えた塗装系の塗膜性能について評価し、河川鋼構造物の現場塗替塗装への適用について検討した。

2. 2 水性塗料の鋼道路橋塗装への適用に関する検討

鋼道路橋の新設塗装、塗替塗装各々について「鋼道路橋塗装・防食便覧⁴⁾」のC-5塗装系（新設時の一般外面塗装系）およびRc-I塗装系（素地調整程度1種、スプレー塗装）、Rc-III塗装系（素地調整程度3種、はけ・ローラー塗装）と同等の性能を有する水性塗装系を構築することを目標とした。30種類の水性塗装系を提案した上で、これらの塗膜性能や施工性などを評価し、鋼道路橋塗装への適用について検討した。

本報告では以上の検討内容とその結果について、下記の項目に整理し述べる。

- ①無溶剤形塗料、低溶剤形塗料の施工性
- ②無溶剤形塗料、低溶剤形塗料の塗膜性能
- ③水性塗料の塗膜性能
- ④水性塗料の施工性
- ⑤VOC削減塗装系の環境負荷低減性

3. 無溶剤形塗料および低溶剤形塗料の施工性に関する検討

3. 1 無溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ塗装試験

無溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ塗装作業性、可使用時間および乾燥性について把握するため、所定の温度・湿度に保った恒温恒湿室内において塗装試験を実施した⁵⁾。

3. 1. 1 試験方法

表-3. 1に示す方法で、無溶剤形エポキシ樹脂塗料（標準用2種類、低温用2種類）を塗装した。比較のために溶剤形エポキシ樹脂塗料（標準用、低温用、各1種類）についても、同様に塗装した。

表-3. 1 はけ塗装試験方法

被塗物	電気亜鉛めっき鋼板* (450mm×900mm)
試験塗料	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 A
	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 B
	溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 (比較)
	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 低温用 D
	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 低温用 E
溶剤形エポキシ樹脂塗料 低温用 (比較)	
混合量	2kg
使用はけ	筋違はけ (サイズ: 15号 毛丈: 52mm)
塗装温度	20℃ (標準用 A)、30℃ (標準用 A、標準用 B) 5℃ (低温用 D、低温用 E)、10℃ (低温用 E)
塗装時間	混合直後、混合から30分後、1時間後、2時間後
目標乾燥膜厚	100μm

*表面にりん酸塩処理による化成皮膜を形成させている。

3. 1. 2 評価の項目と方法

①はけ塗装作業性

はけ塗装作業に支障がないか評価した。

②可使用時間

塗料を混合してから所定時間ごとにはけ塗装と塗料の温度・粘度の測定を行った。塗料温度や粘度の著しい上昇が無く、混合直後に塗装したものと仕上がり外観に大差が出ない時間までを可使用時間とした。なお本研究では、可使用時間の目標を2時間とした。

③仕上がり外観

塗膜のたれ、割れ、しわ等の有無を目視で確認した。

④乾燥性

JIS K 5600-1-1 4.3.5に準拠し、指触乾燥・半硬化乾燥・硬化乾燥時間を評価した。

3. 1. 3 試験結果

表-3. 2に標準用、表-3. 3に低温用各塗料の可使用時間、塗料温度および粘度の測定結果を示す。

表-3. 2 標準用の試験結果

塗装・乾燥温度	20℃		30℃	
	溶剤形 (比較)	無溶剤形 A	無溶剤形 A	無溶剤形 B
混合直後の粘度	9.9dPa・s	37dPa・s	32dPa・s	22dPa・s
可使用時間	8時間	2時間	30分	30分以内
可使用時間終了時の温度	—	29℃	36℃	49℃
可使用時間終了時の粘度	17dPa・s	56dPa・s	34dPa・s	31dPa・s
可使用時間終了から30分後の温度	—	30℃ (混合から2.5時間後)	45℃ (混合から1時間後)	—
可使用時間終了から30分後の粘度	—	69dPa・s	44dPa・s	—

表-3. 3 低温用の試験結果

塗装・乾燥温度	5℃			10℃
	溶剤形 (比較)	無溶剤形 D	無溶剤形 E	無溶剤形 E
混合直後の粘度	20dPa・s	376dPa・s	58dPa・s	38dPa・s
可使用時間	5時間	塗装不可	30分	1時間
可使用時間終了時の温度	—		9℃	29℃
可使用時間終了時の粘度	38dPa・s		48dPa・s	34dPa・s
可使用時間終了から30分後の温度	—		12℃	48℃
可使用時間終了から30分後の粘度	—		52dPa・s	42dPa・s

標準用 A、B は共に、20℃、30℃の塗装で塗装作業性は良好だったが、30℃ではいずれも混合して1時間以内に塗料温度が45℃以上となり、取り扱いが困難にな

った。一方、低温用 D は 5℃では非常に粘度が大きく、混合 1 時間で塗装が困難となった。低温用 E も 5℃では粘度が大きく、目標乾燥膜厚の 100 μm 塗装が困難であった。また、低温用 E は 10℃では混合 1 時間半で塗料温度が 48℃となり、取り扱いが困難になった。

塗装の仕上がり外観は、標準用 A、B では共にはけ目が目立つ仕上がりであり、低温用 D、E は共にたれが多く発生した。これらは無溶剤形塗料の粘度が大きいことが一因と考えられる。

塗膜の乾燥性については、溶剤形塗料が 5℃の低温でも 8 時間で硬化に達したのに対し、低温用 D では 120 時間でようやく硬化に達した。低温用 E においては 5℃、10℃いずれも 168 時間後でも硬化乾燥に達しておらず、溶剤形との顕著な差が見られた。

以上の結果から、無溶剤形エポキシ樹脂塗料は低温では粘度が大きくなり、はけ塗装が困難であること、また低温での硬化乾燥が著しく遅いことが明らかとなった。一方、高温では可使用時間が極端に短くなるが、20℃程度の常温では塗装作業性、硬化乾燥性とも比較的良好であることが確認された。

3. 2 無溶剤形エポキシ樹脂塗料のローラー塗装試験

無溶剤形エポキシ樹脂塗料の常温での塗装作業性について、被塗物と塗装環境、使用量をより現場に近い状態で試験することにした⁵⁾。塗装方法は、大面積の施工性に優れるローラー塗装とした。

3. 2. 1 試験方法

表-3. 4 に示す方法で、無溶剤形エポキシ樹脂塗料 2 種類（標準用 A、B）を塗装し、塗装作業性や塗膜の乾燥性について「3. 1. 2 評価の項目と方法」と同様に評価した。

表-3. 4 ローラー塗装試験方法

被塗物	H 形鋼（長さ 800mm、幅 300mm、高さ 540mm）
塗装面積	約 0.776m ²
素地調整	動力工具にてさび、浮塗膜を除去
試験塗料	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 A 無溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 B
混合量	8kg
使用ローラー	中毛ローラー（毛丈 12mm、長さ 6 inch）
塗装時の気温	26℃
塗装時間	混合直後、混合から 1 時間後（粘度測定のみ） 混合から 2 時間後
目標乾燥膜厚	100 μm

3. 2. 2 試験結果

表-3. 5 に混合後の塗料温度と粘度、ローラー塗装作業性の試験結果を示す。試験塗料 A、B 共に、混合後 2 時間で固化し塗装不可能となった。混合 1 時間後に

においても、粘度そのものは高くないにも関わらず、塗料が被塗物面およびローラーにまとわりつくような挙動を示し、塗装作業は非常に困難であった。よって、目標の可使用時間である 2 時間を満たすことはできないものと判断した。

表-3. 5 ローラー塗装試験の結果

試験塗料	評価項目	混合直後	混合から 1 時間後	混合から 2 時間後
無溶剤形 A	塗料温度	29℃	43℃	70℃
	塗料粘度	37dPa・s	45dPa・s	固化
	ローラー塗装作業性	良好	ローラー重いのびない	塗装不可
無溶剤形 B	塗料温度	30℃	45℃	70℃
	塗料粘度	40dPa・s	26dPa・s	固化
	ローラー塗装作業性	良好	ローラーの転がりが悪く、塗料が広がらない	塗装不可

以上の結果から、無溶剤形エポキシ樹脂塗料を大面積の河川鋼構造物にはけ・ローラーで塗装することは、現状では困難であることが明らかとなった。そこで、スプレー塗装機による無溶剤形エポキシ樹脂塗料の施工性について検討することにした。

3. 3 無溶剤形エポキシ樹脂塗料のスプレー塗装試験

無溶剤形エポキシ樹脂塗料は可使用時間等の施工管理が煩雑であり、一般的なエアレス塗装機による塗装には適さない。無溶剤形エポキシ樹脂塗料の塗装に適用可能と思われる塗装機を探索した結果、電子制御混合式塗装機（図-3. 1）が候補として挙がった。電子制御混合式塗装機は、塗装機本体から所定量の塗料液と硬化剤とを別々に吐出し、塗装機外の混合ミキサー（スタティックミキサー）で混合するものである。



図-3. 1 電子制御混合式塗装機の外観

電子制御混合式塗装機の適用性を検証するために、施工環境の厳しい冬季の低温環境下において、大型の模擬試験桁を用いた無溶剤形エポキシ樹脂塗料の施工試験を実施した⁶⁾。

3. 3. 1 試験方法

①試験塗料

混合比が容量比で 81 (塗料液) : 19 (硬化剤)、質量比で 88 (同) : 12 (同) である無溶剤形エポキシ樹脂塗料を用いた。試験塗料は塗装日の 2 日前から気温の低い屋外に放置し、試験に供した。この塗料を電子制御混合式塗装機およびエアコンプレッサー (吐出空気量 2.5m³/min) を用いてスプレー塗装した。なお、塗装にはスタティックミキサーからスプレーガンまで 10m のホースを用いた。

②塗装対象物

土木研究所朝霧環境材料観測施設に設置した模擬試験桁 (図-3. 2) 内面の旧塗膜をブラスト処理により除去し、有機ジンクリッチペイントを塗装したものを塗装対象とした。塗装面積はおよそ 27 m² である。



(a) 模擬試験桁の外観



(b) 塗装面 (模擬試験桁の内面)

図-3. 2 塗装対象物

③目標乾燥膜厚

目標乾燥膜厚は 300 μm とした。塗装面に膜厚測定用のブリキ板を貼り付け (13 箇所)、塗装後回収し測定を行った。

3. 3. 2 評価項目

①スプレー塗装作業性

塗料の加温から混合調整、塗装機の洗浄にいたるま

で、スプレー塗装作業に支障がないか確認した。

②混合液の硬化状態

塗装機により塗料液と硬化剤とが混合された混合液をプラスチック容器に取り分け、その硬化状態を確認した。比較として、塗料液と硬化剤とを電子天秤で計量し混合したものも、同様に確認した。

③塗膜の硬化性

以下の 2 つの方法で塗膜の硬化性を評価した。比較として、塗料液と硬化剤とを電子天秤で計量後、混合して作製した塗膜についても同様に評価した。

ア) JIS K 5600-1-1 4.3.5 に準拠した指触乾燥、半硬化乾燥、硬化乾燥時間の評価

イ) メチルエチルケトン (MEK) による溶剤ラビングによる評価^(*)

(*) 試験板の上に乗せたガーゼに MEK を 0.5ml 滴下し、このガーゼを金属製蓋で 1 分間覆ったのち、ガーゼで軽く 10 往復擦り、ガーゼに付着した塗料の量を目視評価する方法。評価基準は以下の 4 段階とした。

○ : ガーゼに塗料が全くつかない。あるいは、つくがわずかである。

△ : ガーゼに塗料がつくが、塗膜全体を溶解しているわけではない。

× : ガーゼに塗料がつき、塗膜全体を溶解している。

×× : ガーゼに塗料が大量につき、塗膜全体を溶解している。

④仕上がり外観および乾燥膜厚

塗膜の仕上がり外観を目視で評価した。また、電磁式膜厚計を用い、塗膜厚測定を行った。

3. 3. 3 試験結果

塗装日まで低温の屋外で保管していた塗料は著しく粘度が上昇しており、そのままの状態では塗装機での加温循環が不可能だった (塗料液 650dPa·s (0°C)、硬化剤 150dPa·s (0°C))。また、塗料液と硬化剤との粘度差が大きいことで、塗装機が使用不能となった。そこで、塗料液タンクから加温部への配管を短くすると共に、塗料液と硬化剤とを 20°C 程度の室内で予備加温した後にタンクに注入したところ、循環が可能となり、スプレー塗装は順調に進んだ。

塗装機による混合液の硬化状態を確認した結果を、表-3. 6 に示す。最初に採取した混合液 (1 回目採取の nl) が 16 日経過後も固化せず柔らかい状態だった。他の混合液は、電子天秤で計量混合したものと同じく 4 日経過後に全て固化した。

表-3. 6 混合液の硬化状態

	計量混合 (比較)	1回目採取		2回目採取		3回目採取
		n1	n2	n1	n2	n1, n2
1日後	柔らかい	特に 柔らかい	固化	柔らかい	固化	柔らかい
2日後	流動性なし 押すとへこむ	柔らかい	-	流動性なし 押すとへこむ	-	流動性なし 押すとへこむ
3日後	固形 強く押すと へこむ	柔らかい	-	固形 強く押すと へこむ	-	固形 強く押すと へこむ
4日後	固化	柔らかい	-	固化	-	固化
16日後	-	柔らかい	-	-	-	-

図-3. 3 に塗装機による混合液により作製した塗膜の MEK ラビング試験結果を示す。最初に採取した混合液 (1 回目採取の n1) の塗膜は、16 日経過後においても硬化乾燥に達しておらず、また、塗膜外観にはしわの発生が認められた。これ以降に採取した混合液の塗膜および試験桁に塗装した塗膜は、4 日経過では MEK に容易に溶解したが、7 日経過で溶解程度が小さくなり、16 日経過でほぼ溶解しなくなった。このことから、塗料液と硬化剤との硬化反応が進んでいることがわかった。これらは、電子天秤で計量混合したものと、ほぼ同じ結果となった。

	2日後	4日後	7日後	16日後
計量混合				
スプレー塗装 下フランジ上面 1				
スプレー塗装 下フランジ上面 2				
1 回目採取 n1				
1 回目採取 n2				
2 回目採取 n1				
2 回目採取 n2				
3 回目採取 n1				
3 回目採取 n2				

図-3. 3 MEK ラビング試験の結果

試験桁にスプレー塗装した塗膜の外観には、たれ、

割れ、しわ等の異状は特に認められなかったが、塗装日翌朝に発生した結露の影響により、多くの部分が白化した。塗膜の乾燥膜厚は、いくつかの部位で目標の 300 μm を満たしておらず、ややばらつきの大きい結果となった。

以上の結果より、電子制御混合式エアレススプレー塗装機を用いることにより、可使時間を考慮せずに無溶剤形塗料を施工できることがわかった。その一方で、塗料の加温により適正な粘度に調整しなければならないこと、また、混合不良によって健全な塗膜が形成されない場合があることもわかった。この原因としては、塗装機の混合精度が不十分であり設定混合比通り吐出されていないことや、塗料液と硬化剤との粘度差が大きくスタティックミキサーやホース内で十分に攪拌されていないことなどが考えられる。したがって、本塗装機による塗装の際には、塗装機や使用材料の特徴を十分に把握し、健全な塗膜が得られることを確認した上で実施しなければならない。また、塗装機や周辺機器を設置するための敷地の確保や、塗料の飛散防止対策も必要となる。これらは、工場塗装ならば容易に対応することも可能であるが、様々な制約がある現場塗装においては、現実的には困難であると思われる。

以上、無溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ・ローラー塗装、電子制御混合式塗装機による塗装について検討した結果、現段階で無溶剤形塗料を河川鋼構造物の現場での塗替塗装に適用することは困難であるとの結論に至った。そこで無溶剤形塗料よりも VOC 削減率は低くなるが、従来の溶剤形塗料に比べて大幅に VOC を削減することのできる低溶剤形塗料について同様の検討を行い、河川鋼構造物塗装への適用を図ることにした。

なお、本研究では、低溶剤形エポキシ樹脂塗料について、「塗装時の最大希釈時の VOC 量が 30% (質量) 以下」であるものと定義した。

3. 4 低溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ塗装試験

3. 4. 1 試験方法

低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (標準用 2 種類、低温用 2 種類) について、はけ塗装試験を行い、塗装作業性や可使時間、乾燥性等を評価した⁶⁾。試験方法は表-3. 7 に示したもののほか、「3. 1 無溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ塗装試験」と同様とした。ただし、低溶剤形エポキシ樹脂塗料に対する目標の可使時間を、3 時間 (20℃) とした。

表一. 3. 7 はけ塗装試験方法

被塗物	ボンデライト鋼板 (450mm×900mm)
試験塗料	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 A 低溶剤形エポキシ樹脂塗料 標準用 B 無溶剤形エポキシ樹脂塗料 低温用 C 無溶剤形エポキシ樹脂塗料 低温用 D
混合量	2kg
希釈量	製品に規定する量
塗装温度	20℃ (標準用 A)、 30℃ (標準用 A、標準用 B) 10℃ (低温用 C、低温用 D)
塗装時間	混合直後、混合 2 時間後
目標乾燥膜厚	100 μm

3. 4. 2 試験結果

標準用 A、B 共に、20℃、30℃におけるはけ塗装作業性に支障はなく良好だった。低温用も C、D 共に 10℃でも塗りやすく、はけ塗装作業性に支障はなかった。

表一. 3. 8 に標準用、表一. 3. 9 に低温用の各塗料の各温度での可使時間、塗料温度と塗料粘度の測定結果を示す。標準用は A、B 共に 20℃で 5 時間、30℃で 3 時間の可使時間があり、また、低温用も 10℃で 5 時間の可使時間があり、実用上、問題のない性能であると考えられる。

表一. 3. 8 標準用の試験結果

塗装・乾燥温度	20℃		30℃	
	標準用 A	標準用 B	標準用 A	標準用 B
試験塗料	標準用 A	標準用 B	標準用 A	標準用 B
希釈率 (%)	5%	なし	2%	3%
混合直後の粘度	24dPa・s	21.4dPa・s	27dPa・s	11dPa・s
可使時間	5 時間	5 時間 (塗りにくい)	3 時間 (少し重い)	3 時間
可使時間終了時の温度	22℃	22℃	32℃	30℃
可使時間終了時の粘度	33dPa・s	27dPa・s	40dPa・s	16dPa・s

表一. 3. 9 低温用の試験結果

塗装・乾燥温度	10℃	
試験塗料	低温用 C	低温用 D
試験塗料	低温用 C	低温用 D
希釈率 (%)	なし	5%
混合直後の粘度	57dPa・s	29dPa・s
可使時間	5 時間	5 時間
可使時間終了時の温度	10℃	10℃
可使時間終了時の粘度	82dPa・s	52dPa・s



図一. 3. 4 標準用の塗り継ぎ部の凹凸

はけ塗装による塗膜の仕上がり外観は、標準用では塗り継ぎ部やはけ目の凹凸がやや目立った(図一. 3. 4)。低温用では、混合 5 時間後に塗装した塗膜でたれが見られた。これらは、低溶剤形塗料に含まれる溶剤量が少な上に、厚膜での塗装が必要なことから避けられないものであると考えられる。

20℃、30℃では標準用 A、B 共に、塗装 24 時間後には硬化乾燥に達していた。10℃においても低温用 C、D 共に、塗装 48 時間後には硬化乾燥に達しており、無溶剤形エポキシ樹脂塗料のような極端な乾燥遅延は見られなかった。

以上の結果から低溶剤形エポキシ樹脂塗料は、はけ塗装作業性、可使時間、乾燥性において比較的良好な性能を有していることが明らかとなった。そこで次に、塗料粘度が高くなり、はけ・ローラーの取り扱いが困難となる、低温環境下での施工試験を実施した。

3. 5 低溶剤形エポキシ樹脂塗料のローラー塗装試験

3. 5. 1 試験方法

土木研究所朝霧環境材料観測施設に設置された模擬試験桁(図一. 3. 2 と同様)を用い、低溶剤形エポキシ樹脂塗料のローラー塗装試験を行った⁷⁾。試験方法は表一. 3. 10 に示す通りである。

表一. 3. 10 ローラー塗装試験方法

塗装対象物	模擬試験桁内面
塗装面積	約 7 m ² (塗料 1 種類につき)
塗装方法	平面部：ローラー塗装 狭あい部・添接部・高力ボルト部：はけ塗装
試験塗料	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 A (加熱残分 80%) 低溶剤形エポキシ樹脂塗料 B (加熱残分 81%)
混合量	A : 10.5kg B : 10kg
希釈量	製品に規定する量
塗装時間	混合直後、混合 5 時間後
目標乾燥膜厚	100 μm

3. 5. 2 評価の項目と方法

①ローラー塗装作業性

ローラー塗装作業に支障がないか確認した。

②可使時間

混合 5 時間後にローラーで塗装し、混合直後と比べて作業性に大差がないときは、「可使時間 5 時間問題なし」とした。

③塗り重ね適性

①②の評価の翌日、同じ塗料を同様の方法で塗り重ね、作業性を評価した。

④乾燥性

③の塗膜の硬化乾燥を、JIS K 5600-1-1 4.3.5 に準じて評価した。

⑤仕上がり外観

③の塗膜の仕上がり外観を目視で評価した。

⑥塗膜厚測定

塗装面に貼り付けて塗装したブリキ板を塗装後に回収し、その塗膜厚を電磁式膜厚計を用いて測定した。

3. 5. 3 試験結果

低溶剤形エポキシ樹脂塗料のローラー塗装作業性評価結果を表-3. 11に示す。試験塗料A、B共に、混合直後のローラー塗装作業に支障はなく、問題なく施工できた。混合5時間後では、塗料Bのローラー塗装作業がやや重かったが、塗装は可能であった。5時間経過により塗料粘度が上昇したためと思われる。塗料A、B共に、塗装翌日の塗り重ね塗装作業に支障はなく、問題なく施工できた。

表-3. 11 ローラー塗装試験の結果

		塗料A	塗料B
混合直後	希釈量	3%	2%
	希釈後粘度	26 dPa・s (6℃)	37 dPa・s (7℃)
	希釈後の加熱残分	78.6%	79.4%
	塗装時の気温	5℃	5℃
	作業性	問題なし 塗りやすい	問題なし 塗りやすい
	塗装面積	約4 m ²	約4 m ²
	ウェット膜厚	はけ150 μm ローラー150~175 μm	はけ150 μm ローラー150 μm
	塗料使用量	1.52kg	1.62kg
混合5時間後	混合5時間後の粘度	30 dPa・s (9℃)	45 dPa・s (12℃)
	追加希釈量	なし	なし
	塗装時の気温	4.4℃	4.4℃
	塗装面積	約3 m ²	約3 m ²
	作業性	問題なし 塗りやすい	やや重い
	塗料使用量	0.92kg	1.0kg
塗り重ね適正	希釈量	3%	2%
	希釈後粘度	28 dPa・s (10℃)	30 dPa・s (14℃)
	塗装時の気温	8℃	9℃
	塗装面積	約7 m ²	7 m ²
	作業性 (ローラー)	問題なし 塗りやすい	問題なし 塗りやすい
	ウェット膜厚*	(ローラー150 μm)	(ローラー150 μm)
	塗料使用量	2.3kg	2.1kg

塗膜の乾燥性については、両試験塗料共に、塗装翌日に半硬化乾燥に達しており、冬季環境下でも著しい硬化の遅れは見られなかった。一方、仕上がり外観は塗料A、B共に、やや凹凸が大きい外観となったものの、たれ、割れ、膨れはみられなかった。また、1層目および2層目を塗装した翌朝には天井面に結露水が付着していたが、白化は見られなかった。塗料A、B共にばらつきは大きいものの、目標乾燥膜厚100 μm (2層合計200 μm) はほぼ満たしていた。

以上の結果より、試験した低溶剤形エポキシ樹脂塗料のはけ・ローラー塗装作業性、可使時間、塗り重ね適性は比較的良好であり、低温環境下においても十分施工可能であることがわかった。仕上がり外観は、従来の溶剤形エポキシ樹脂塗料と比べて凹凸が大きく平滑性に劣るが、これは、低溶剤形塗料は塗料中の溶剂量および希釈量が少なく、高粘度の状態では塗装しなければならぬためである。ただし、仕上がり外観が劣っていても目標膜厚が確保されていれば、防食性能も確保されるものと考えられる。

4. 無溶剤形塗料および低溶剤形塗料の塗膜性能に関する検討

河川鋼構造物塗装における現行の溶剤形塗料系のエポキシ樹脂塗料を、無溶剤形エポキシ樹脂塗料または低溶剤形エポキシ樹脂塗料に置き換えたVOC削減塗料系を提案し、各種塗膜性能試験を実施した。表-4. 1~表-4. 4に試験に供した塗料系をまとめた。表中に示した各塗料系のVOC削減率は、各工程の塗装時の最大希釈量を含めた数値である。なお、参考として、厚膜塗料タイプの無溶剤形塗料エポキシ樹脂塗料、無溶剤形ポリウレタン樹脂塗料も同様に試験した。

4. 1 試験方法

4. 1. 1 試験板

試験板はJIS K 5600-1-4に規定された材料(鋼板の厚さ3mm以上はJIS G 3101に規定するSS400)を用い、以下の条件でプラスト処理したものを使用した。

- ・除せい度：ISO 8500-1 Sa2 1/2
- ・研掃材：グリッド
- ・Rz JIS：34 μm (実測値)

水中部浸せき試験および屋外暴露試験に用いる試験板は、プラスト処理した鋼板にエポキシ樹脂塗料を塗装し、海浜地区で暴露し劣化させた後、素地調整程度2種および3種を実施したものも使用した。屋外暴露試験用の試験板の一部には塗り残し部を設け、鋼素地のまま暴露に供した。

4. 1. 2 塗装方法

各塗料系の第1層目から最終層まで、それぞれの規定膜厚になるようにはけ塗装を行った。各工程の塗料間隔は1日以上とした。また、屋外暴露試験および複合サイクル腐食試験の試験板には、塗装終了後、鋼素地に達する傷を入れて試験を行った。

4. 1. 3 塗膜性能試験方法

①水中浸せき試験

江戸川水門下流側の汽水域⁷⁾に試験板を浸せきし、

塗膜の耐水性を評価した。所定の期間浸せき後、試験板を引き上げ、目視にて塗膜のさび、膨れ、割れ、はく離などの有無を観察した。さびの評価はASTM D-610、膨れの評価はASTM D-714に準じた。また、JIS K 5600 5.6 に準じ、プルオフ法による引張付着試験を行い、塗膜の付着強度を評価した。

②温度勾配試験

塗膜の耐水性を短期間で確認するために、試験板の表裏で温度差が生じるように設定した水中に試験板を浸せきした。水の温度は塗膜表面を40℃、試験板の裏面を20℃とし、浸せき期間は28日間とした。浸せき後の試験板について、①と同様の評価を行った。

表-4. 1 塗膜性能試験に供した塗装系（水中部塗装系①）

塗装系	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	VOC削減率①*	VOC削減率②**
溶剤形	有機 ジンクリッチ ペイント (300 g/㎡ 37.5 μm)	有機 ジンクリッチ ペイント (300 g/㎡ 37.5 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	-	-
無溶剤形①			無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	-	-	94.0%	68.4%
無溶剤形②			無溶剤形ウレタン用プライマー (60 g/㎡ 20 μm)	無溶剤形ウレタン (700 g/㎡ 500 μm)	-	-	91.1%	66.3%
無溶剤形③			無溶剤形エポキシ樹脂塗料*** (470 g/㎡ 250 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料*** (470 g/㎡ 250 μm)	-	-	92.7%	67.4%
低溶剤形①			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (400 g/㎡ 150 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (400 g/㎡ 150 μm)	-	-	52.1%	37.9%
低溶剤形②			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	-	67.2%	48.9%
低溶剤形③			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	77.0%	56.0%
低溶剤形④			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (300 g/㎡ 120 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (300 g/㎡ 120 μm)	-	-	67.2%	48.9%
低溶剤形⑤			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (350 g/㎡ 120 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (350 g/㎡ 120 μm)	-	-	56.3%	40.9%

*エポキシ樹脂塗料の VOC 削減率

**塗装系全体での VOC 削減率

***JWWA K 157 水道用無溶剤形エポキシ樹脂塗料（日本水道協会）

表-4. 2 塗膜性能試験に供した塗装系（水中部塗装系②）

塗装系	補修塗装	1層目	2層目	3層目	4層目	VOC削減率①*	VOC削減率②**
溶剤形	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240 g/㎡ 60 μm)	-	-
無溶剤形①	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	-	-	94.0%	83.6%
無溶剤形②	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	無溶剤形ウレタン用 プライマー (60 g/㎡ 20 μm)	無溶剤形ウレタン (700 g/㎡ 500 μm)	-	-	91.1%	81.0%
無溶剤形③	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 *** (470 g/㎡ 250 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 *** (470 g/㎡ 250 μm)	-	-	92.7%	82.4%
低溶剤形①	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (110 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (400 g/㎡ 150 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (400 g/㎡ 150 μm)	-	-	52.1%	40.1%
低溶剤形②	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (80 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (210 g/㎡ 80 μm)	-	67.2%	67.1%
低溶剤形③	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (130 g/㎡ 60 μm)	77.0%	68.4%
低溶剤形④	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (120 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (300 g/㎡ 120 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (300 g/㎡ 120 μm)	-	-	67.2%	59.7%
低溶剤形⑤	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (90 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (350 g/㎡ 120 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (350 g/㎡ 120 μm)	-	-	56.3%	56.1%

*エポキシ樹脂塗料の VOC 削減率

**塗装系全体での VOC 削減率

***JWWA K 157 水道用無溶剤形エポキシ樹脂塗料（日本水道協会）

表-4.3 塗膜性能試験に供した塗装系（大気部塗装系①）

塗装系	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	VOC削減率①*	VOC削減率②**
溶剤形	有機 ジンクリッチ ペイント (300 g/㎡ 37.5 μm)	有機 ジンクリッチ ペイント (300 g/㎡ 37.5 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240 g/㎡ 60 μm)	ふっ素樹脂塗料用中塗 (180 g/㎡ 40 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗 (140 g/㎡ 30 μm)	—	—
無溶剤形①			無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	水性水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (170 g/㎡ 40 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (114 g/㎡ 30 μm)	—	93.5%	62.4%
低溶剤形①			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (400 g/㎡ 150 μm)	VOC削減 アクリルシリコン樹脂 中塗上塗兼用塗料 (160 g/㎡ 55 μm)	—	—	48.2%	48.4%
低溶剤形②			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (190 g/㎡ 70 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (190 g/㎡ 70 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (140 g/㎡ 30 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (120 g/㎡ 25 μm)	57.2%	47.9%
低溶剤形③			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (152 g/㎡ 70 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (152 g/㎡ 70 μm)	VOC削減 ふっ素樹脂塗料上塗 (177 g/㎡ 50 μm)	—	70.9%	40.2%
低溶剤形④			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (300 g/㎡ 120 μm)	水性水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (170 g/㎡ 40 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (114 g/㎡ 30 μm)	—	64.5%	51.2%
低溶剤形⑤			低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (150 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (150 g/㎡ 60 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (140 g/㎡ 30 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (140 g/㎡ 30 μm)	67.9%	51.8%

*エポキシ樹脂塗料の VOC 削減率

**塗装系全体での VOC 削減率

表-4.4 塗膜性能試験に供した塗装系（大気部塗装系②）

塗装系	補修塗装	1層目	2層目	3層目	4層目	VOC削減率①*	VOC削減率②**
溶剤形	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120 g/㎡ 30 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240 g/㎡ 60 μm)	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240 g/㎡ 60 μm)	ふっ素樹脂塗料用中塗 (180 g/㎡ 40 μm)	ふっ素樹脂塗料上塗 (140 g/㎡ 30 μm)	—	—
無溶剤形①	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120 g/㎡ 30 μm)	無溶剤形エポキシ樹脂塗料 (230 g/㎡ 120 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (170 g/㎡ 40 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (114 g/㎡ 30 μm)	—	93.5%	79.8%
低溶剤形①	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (400 g/㎡ 150 μm)	VOC削減 アクリルシリコン樹脂 中塗上塗兼用塗料 (160 g/㎡ 55 μm)	—	—	48.2%	47.2%
低溶剤形②	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (80 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (190 g/㎡ 70 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (190 g/㎡ 70 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (140 g/㎡ 30 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (120 g/㎡ 25 μm)	57.2%	69.2%
低溶剤形③	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (152 g/㎡ 70 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (152 g/㎡ 70 μm)	VOC削減 ふっ素樹脂塗料上塗 (177 g/㎡ 50 μm)	—	70.9%	51.4%
低溶剤形④	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (300 g/㎡ 120 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (170 g/㎡ 40 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (114 g/㎡ 30 μm)	—	64.5%	65.4%
低溶剤形⑤	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (75 g/㎡ 30 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (150 g/㎡ 60 μm)	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (150 g/㎡ 60 μm)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (140 g/㎡ 30 μm)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (140 g/㎡ 30 μm)	67.9%	74.6%

*エポキシ樹脂塗料の VOC 削減率

**塗装系全体での VOC 削減率

③おもり落下試験

塗膜の耐衝撃性を確認するために、JIS K 5600 5.3 に準じ、デュポン式落下試験を行った。おもりの質量と落下高さは、JIS K 5551 7.11 に準じ 300g/500mm、500g/500mm とした。試験後の試験板について、目視にて塗膜の割れ、はく離の有無について評価した。また、落下試験後の試験板に対し塩水噴霧試験 (SST) を 24 時間行い、落下試験痕からのさびの発生の有無について目視で観察し、評価した。割れ、はく離および塩水噴霧 24 時間後のさびの評価基準は以下の通りとした。
(おもり落下試験後の割れ・はく離の評価基準)

○：割れ・はく離なし

△：部分的に、もしくは小さな割れ・はく離が見られる

×：全体的に、もしくは大きな割れ・はく離が見られる

(塩水噴霧後のさびの評価基準)

○：さびなし

△：わずかにさびあり

×：さびあり④磨耗試験

塗膜の耐磨耗性を JIS K 5600-5-9 に準じて評価した。磨耗輪質量 1kg×2、磨耗輪 No. CS-17、回転数 1000 回転とした。試験前後の試験板の質量を電子天秤で測定し、質量損失を算出した。

⑤屋外暴露試験

塗膜の防食性を確認するため、国土交通省江戸川河川事務所江戸川河口出張所構内の暴露架台に試験板を設置し、屋外暴露時における塗膜の経時変化を評価した。所定の期間暴露後の試験板の塗膜に対し、一般部については目視にてさび、膨れ、割れ、はく離などの有無を観察した。さびの評価は ASTM D-610、膨れの評価は ASTM D-714 に準じた。一方、カット部については、

カット部からの膨れ最大幅（片側侵入幅で最大値）を評価した。また、JIS K 5600 5.6 に準じプルオフ法による引張付着試験を行い、塗膜の付着強度を評価した。

⑥複合サイクル腐食試験

塗膜の防食性を短期間で確認するために、サイクル腐食環境での耐久性を評価した。試験サイクルは土木研究所式とした。所定のサイクル経過後の試験板の塗膜に対し、⑤と同様の評価を行った。

4. 2 試験結果

4. 2. 1 塗膜の耐水性

江戸川での浸せき試験では、2年目までの結果が得られている。外観観察結果の一例を表-4. 5 に示す。溶剤形塗装系と比較し、低溶剤形塗装系の一部で膨れが多く見られるものがあったが、ほとんどの無溶剤形塗装系および低溶剤形塗装系は、溶剤形塗装系と同等の結果となっている。塗膜の付着力についても、溶剤形塗料系と無溶剤形塗装系、および低溶剤形塗装系とで、明確な差異は得られなかった。

表-4. 5 水中部塗装系①の外観観察結果（ブラスト処理鋼板）

浸せき期間	1年		2年	
	n1	n2	n1	n2
溶剤形	異状なし	膨れ 8F	異状なし	膨れ 4F
無溶剤形①	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
無溶剤形②	膨れ 6F	異状なし	膨れ 6F	膨れ 6F
無溶剤形③	膨れ 8F	膨れ 8F	膨れ 8F	膨れ 8F
低溶剤形①	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
低溶剤形②	異状なし	異状なし	試験板紛失	膨れ 8F
低溶剤形③	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
低溶剤形④	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
低溶剤形⑤	膨れ 6M	膨れ 6M	膨れ 6M	膨れ 6M

表-4. 6 温度勾配試験の結果

試験時期	7日後		28日後		
	外観	外観	付着力 (MPa)	はく離箇所 および面積比 (%)	
溶剤形	異状なし	異状なし	1.5	ジンク 100	
無溶剤形	①	異状なし	膨れ 2F	2.6	ジンク 100
	②	異状なし	膨れ 4D	3.0	素地 85 下塗 15
	③	異状なし	異状なし	2.4	素地 100
低溶剤形	①	異状なし	膨れ 4F	2.8	ジンク 100
	②	異状なし	膨れ 4MD	2.8	素地 10 ジンク 90
	③	異状なし	膨れ 8M	2.0	素地 100
	④	異状なし	膨れ 2F	2.9	素地 60 下塗 40
	⑤	異状なし	膨れ 4MD	1.2	素地 80 ジンク 20

ジンク：有機ジンクリッチペイント層での凝集破壊

一方、温度勾配試験では、いずれの塗装系も7日後では異状はなかった（表-4. 6）。28日後では無溶剤形塗装系、低溶剤形塗装系共に膨れが発生しているも

のが多かったが、ほとんどの仕様が2MPa以上の付着力を示しており、良好な付着力を保っていた。

4. 2. 2 塗膜の防食性

屋外暴露試験では、これまでに暴露2年後までの結果が得られている。いずれの塗装系も一般部の外観には異状は見られず良好な結果であった。一方、カット部では、溶剤形塗装系と比較し、無溶剤形塗装系、低溶剤形塗装系はやや膨れ幅が大きいものも見られた。

表-4. 7に付着試験の結果の一例を示す。いずれの塗装系も、暴露前後で2MPa以上の付着力があり、良好な結果だった。

表-4. 7 大気部塗装系①の付着試験結果（ブラスト鋼板）

試験時期	評価項目	暴露前		暴露2年後	
		付着力 (MPa)	はく離箇所 および面積比 (%)	付着力 (MPa)	はく離箇所 および面積比 (%)
	溶剤形	3.0	下 90 中 10	3.5	素 95 下 5
	無溶剤 ①	7.0<	—	7.0<	—
低溶剤	①	3.0	接 100	3.5	下/中 90 接 10
	②	3.0	下 60 中 30 接 10	5.5	下 60 中 40
	③	7.0<	—	4.0	接 100
	④	7.0<	—	5.5	下 100
	⑤	3.0	ジンク 30 中 40 接 30	3.5	下 100

素：素材、ジンク：有機ジンクリッチペイント、下：下塗、下/中：下塗と中塗の層間、接：接着剤からのそれぞれのはく離

一方、複合サイクル試験では、試験版の一般部では低溶剤形塗装系でわずかに膨れが発生していた他は、無溶剤形塗装系および低溶剤形塗装系共に溶剤形塗装系とほぼ同等だった。カット部では、溶剤形塗装系と比較し、無溶剤形塗装系、低溶剤形塗装系共にやや膨れ幅が大きかった。

4. 2. 3 塗膜の耐衝撃性

表-4. 8におもり落下試験結果の一例を示す。300gのおもりを500mmの高さから落下させた試験では、低溶剤形塗装系でわずかにはく離や割れが生じるものがあったが、ほとんどの仕様が異状はなく、溶剤形塗装系と同等の結果となった。また、はく離・割れが生じた塗装系も、塩水噴霧試験（SST）24時間投入によってさびが発生することはなかった。

一方、500mmの高さから500gのおもりを落下させたところ、溶剤形塗装系も含めて、わずかにはく離や割れが生じるものがあった。試験後SSTによって、低溶剤形塗装系でさびが生じるものもあった。

表-4. 8 おもり落下試験の結果

試験時期	おもり落下試験後		SST24 時間後		
	300g/500mm	500g/500mm	300g/500mm	500g/500mm	
低溶剤形エポキシ樹脂塗料	①				
		○	△	○	○
	②				
		○	△	○	○
	③				
	△	△	○	○	
④					
	△	×	○	×	
⑤					
	△	×	△	△	

4. 2. 4 塗膜の耐摩耗性

表-4. 9 に磨耗試験結果を示す。無溶剤形塗装系および低溶剤形塗装系共に、溶剤形塗装系と比べ良好な耐摩耗性を示した。

以上、無溶剤形エポキシ樹脂塗料および低溶剤形エポキシ樹脂塗料を適用した VOC 削減塗装系の塗膜性能

試験の結果、一部の水中部用塗装系において現行の溶剤形塗装系よりも耐水性にやや劣っていたが、その他の塗装系や大気部塗装系については、溶剤形塗装系と概ね同等の性能を有していることが明らかとなった。

表-4. 9 磨耗性試験の結果

塗装系	質量損失 (g)
溶剤形	0.130
無溶剤形①	0.075
無溶剤形②	0.046
無溶剤形③	0.070
低溶剤形①	0.118
低溶剤形②	0.084
低溶剤形③	0.071
低溶剤形④	0.111
低溶剤形⑤	0.099

5. 水性塗料の塗膜性能に関する検討

鋼道路橋塗装における現行の溶剤形塗装系である「鋼道路橋塗装・防食便覧」C-5 塗装系、Rc-I 塗装系、Rc-III 塗装系に対応する、水性塗料を適用した VOC 削減塗装系をそれぞれ提案し、各種塗膜性能試験を行った^{8)~10)}。試験に供した塗装系を表-5. 1~表-5. 3 に示す。表中に示した各塗装系の VOC 量は、「鋼道路橋塗装・防食便覧」に規定されているエアレス塗装での最大希釈率を適用して算出した。

表-5. 1 塗膜性能試験に供した塗装系 (新設塗装用)

塗装系 No.	B8	B1						B2					
	塗装系の内容	完全水性塗装系						無機ジンクリッチペイントのみ 溶剤形塗料を適用した水性塗装系					
防食下地	溶剤形無機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)	水性無機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)						溶剤形無機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)					
ミストコート	溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 (160g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 (160g/m ²)						水性エポキシ樹脂塗料下塗 (160g/m ²)					
下塗 1 層目	溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 120 μm (540g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)						水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)					
下塗 2 層目		水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)						水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)					
中塗	溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)						水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)					
上塗	溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)						水性ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)					
合計膜厚 (μm)	250	250						250					
塗料 No.	(比較)	①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④	⑤	⑥
VOC 量 (g/m ²)	775	57	64	25	34	54	62	201	238	193	196	222	193
VOC 削減率 (%)	—	92	91	96	95	93	92	74	69	75	74	71	75

表-5. 2 塗膜性能試験に供した塗装系（塗替塗装用（素地調整程度1種））

塗装系 No.	B9	B3					
塗装系の内容	Rc-I 塗装系（比較）	完全水性塗装系					
防食下地	溶剤形有機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)	水性有機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)					
下塗1層目	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)					
下塗2層目	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)					
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)					
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)	水性ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)					
合計膜厚(μm)	250	250					
塗料 No.	(比較)	①	②	③	④	⑤	⑥
VOC量(g/m ²)	556	58	83	16	35	76	42
VOC削減率(%)	—	89	85	97	93	86	92

表-5. 3 塗膜性能試験に供した塗装系（塗替塗装用（素地調整程度3種））

塗装系 No.	B10	B4					
塗装系の内容	Rc-III 塗装系（比較）	完全水性塗装系					
補修塗り (鋼材露出部)	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)					
下塗1層目	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)					
下塗2層目	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)					
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)	水性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)					
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (140g/m ²)					
合計膜厚(μm)	235	235					
塗料 No.	(比較)	①	②	③	④	⑤	⑥
VOC量(g/m ²)	347	53	58	11	30	49	34
VOC削減率(%)	—	84	83	96	91	85	90

5. 1 試験方法

5. 1. 1 試験板

試験板は JIS K 5600-1-4 に規定された材料（鋼板の厚さ 3mm 以上は JIS G 3101 に規定する SS400）をブラスト処理した鋼板（300mm×200mm×3.2mm）とした。ブラストの条件は防錆度：ISO 8501-1 Sa2 1/2、研掃材：グリッド、表面粗さ：25 μm Rzjis 目標で実施した。

屋外暴露試験には、上記のブラスト処理鋼板および旧塗膜・さび混在塗装鋼板を用いた。旧塗膜・さび混在塗装鋼板は、塗替塗装用水性塗装系の評価に使用するため、ブラスト処理鋼板に無塗装部も設定し、JIS K 5621 の一般さび止め塗料を塗装し、12～5 月の半年間、海浜地区で屋外暴露し作製した。この旧塗膜・さび混在塗装鋼板を 1 種、2 種、3 種の各程度の素地調整を実施し試験に供した。

5. 1. 2 塗装方法

各塗装系の第 1 層から最終層までを各々規定膜厚になるようにスプレー塗装した。各工程の塗装間隔は、

無機ジンクリッチペイント塗装後は 2 日以上、その他の工程では 1 日以上とし、最終工程の上塗の色は白（N-9.5 近似）とした。

5. 1. 3 塗膜性能試験方法

①屋外暴露試験

塗膜の耐候性と防食性を確認するために、気象条件が異なる下記の暴露試験場で屋外暴露試験を実施した。

ア) 亜熱帯/海浜地区の沖縄県大宜味村：沖縄建設材料耐久性試験施設（沖縄暴露場）

イ) 温帯環境/内陸地区の茨城県つくば市：土木研究所建設材料研究施設（つくば暴露場）

所定の期間暴露後の試験板の塗膜に対し、一般部については、目視にてさび、膨れ、割れ、はく離などの有無を観察した。さびの評価は ASTM D-610、膨れの評価は ASTM D-714 に準じた。一方、カット部については、カット部からの膨れ最大幅（片側侵入幅で最大値）を評価した。塗膜の表面状態については走査型電子顕微鏡（SEM）で詳細に観察するとともに、表面樹脂の劣化

状態をフーリエ変換型赤外分光光度計 (FT-IR) により ATR 法で測定した。

塗膜の付着性については、テープ付着試験 (基盤目法・5mm 升目 9 目)、引張付着試験 (プルオフ法) により評価した。その他、塗膜の光沢度、色差、交流抵抗・静電容量、直流抵抗などの測定を行った。

②複合サイクル腐食試験

塗膜の防食性を短時間で評価するために、塩水噴霧・乾燥・湿潤のサイクル試験環境での耐久性を確認した。試験条件が異なる土木研究所式と JIS 式の 2 つの試験を行った。試験片の寸法は 150mm×70mm×3.2mm とした。所定のサイクル経過後の試験片の塗膜に対し、外観観察と付着性の評価を行った。

③促進耐候性試験

塗膜の促進耐候性試験はキセノンランプ法で試験した。試験装置はキセノンウェザーメーター (スガ試験機: SX2-75) を用いた。試験片の寸法は 150mm×70mm×3.2mm とした。所定の試験期間経過後の試験片の塗膜に対し、光沢度および色差の測定を行った。

④耐湿性試験

耐湿性試験装置を用いて、塗膜の連続結露に対する抵抗性を評価した。試験片の寸法は 150mm×70mm×3.2mm とした。所定の試験期間経過後の試験片の塗膜に対し、目視観察にて膨れ、はがれ、割れ、さびなどの欠陥の有無を評価した。

⑤耐湿潤冷熱繰返し性試験

耐湿潤冷熱繰返し性試験装置を用いて、塗膜の冷熱繰返しに対する抵抗性を評価した。所定の試験期間経過後の試験片の塗膜に対し、④と同様に評価を行った。

⑥塗膜特性試験

塗膜の環境遮断性 (酸素透過性、透湿度) と力学的物性 (破断ひずみ、破断応力、応力緩和能) を測定し、各種塗装系の塗膜物性を把握した。測定は室温で 1~2 ヶ月乾燥・養生させた塗膜を用いた。

塗膜の酸素透過性については、酸素透過率測定装置 (ツクバリカセイキ: K-316) を用いて測定した。試験用塗膜フィルムは、ジンクリッチペイントを除いた複合塗膜 (下塗+中塗+上塗) を用い、サイズは φ18mm とした。一方、水蒸気透過度 (透湿度) は JIS K 7129 (A 法) に規定された感湿センサーで測定する水蒸気透過度計 (Lyssy: L80-4000) 型を用いて測定した。試験用塗膜フィルムは、ジンクリッチペイントを除いた複合塗膜 (下塗+中塗+上塗) を用い、サイズは 110mm 以上×110mm 以上 (測定面積: 80mm φ) とした。

塗膜の力学的物性は小型卓上試験機 (島津製作所:

EZtest) を用いて、塗膜に引張荷重を与えたときの破断応力および破断時の伸び率と、塗膜に一定の伸びを与えた時の応力残存率の経時変化を測定し、応力残存率が 50% になるまでの時間を応力緩和能として求めた。試験用塗膜フィルムは、ジンクリッチペイントを除いた複合塗膜 (下塗+中塗+上塗) を用い、サイズは 40mm×5mm (試験長さは 20mm) とした。なお、測定条件は、①破断応力および伸び率測定時のクロスヘッド速度は 10mm/分とし、②応力緩和能測定時の測定開始時の伸びは、長さ 20mm の 1% (0.2mm) とした。

5. 2 試験結果

5. 2. 1 新設用塗装系

①塗膜の耐候性および防食性

屋外暴露試験では、これまでに暴露 3 年目までの結果が得られている。提案塗装系 B1 の一部の試験板においてカット部の膨れ幅が溶剤系に比べて大きかった以外は、いずれも溶剤形塗装系とほぼ同等の外観となっている。提案塗装系 B2 においても、溶剤形塗装系と同等の外観である。屋外暴露 3 年経過後の試験板に対し塗膜の付着性を評価した結果、いずれの塗装系も暴露により付着強度が向上することがわかった。

試験板水洗後の塗膜の光沢測定結果の一部を、図-5.1 に示す。沖縄暴露 3 年経過時において、塗装系 B2 の③のみ表面の光沢保持率が溶剤形より若干劣っていたが、その他の塗装系では溶剤形と同等以上の結果となった。つくば暴露では、いずれの試験板も 3 年経過時点では、顕著な光沢低下は認められなかった。一方、色差測定においては、水性塗装系も溶剤形塗装系も明確な差異が認められなかった。

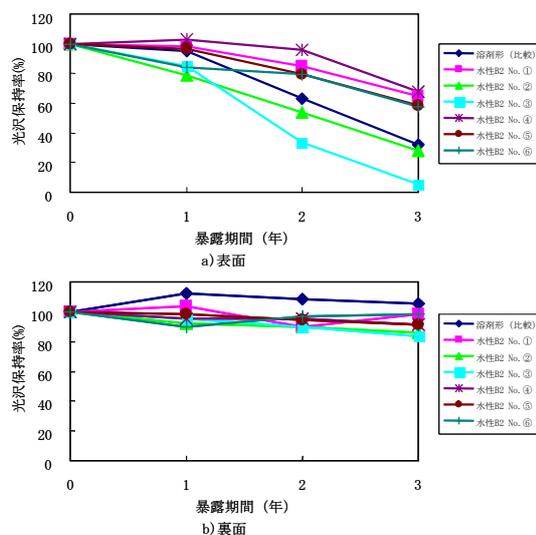


図-5. 1 屋外暴露 (沖縄) における塗膜の光沢保持率の経時変化 (塗装系 B2)

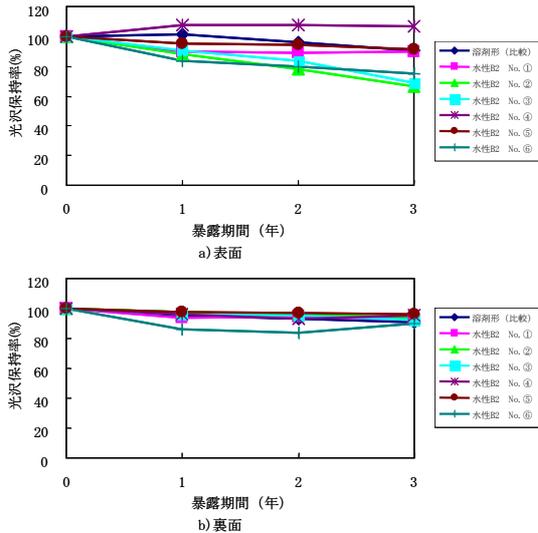


図-5. 2 屋外暴露（つくば）における塗膜の光沢保持率の経時変化（塗装系 B2）

屋外暴露前後において、水性ふっ素樹脂塗料上塗塗膜の表面形状を、走査型電子顕微鏡により観察したところ、沖縄暴露3年後では、いずれの供試塗料も溶剤形と同様に、塗膜表面の樹脂層が劣化・消失し始めていることが確認できた。この他、屋外暴露前後における塗膜のインピーダンスや直流抵抗の測定を行ったが、暴露による変化の傾向は水性塗装系、溶剤形塗装系ともにほぼ同等であった。

促進耐候性試験（キセノンランプ法）における塗膜の光沢保持率の経時変化を図-5. 3に、色差の経時変化を図-5. 4にそれぞれ示す。

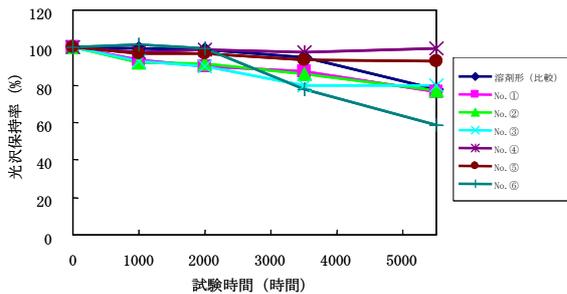


図-5. 3 促進耐候性試験における塗膜光沢の経時変化

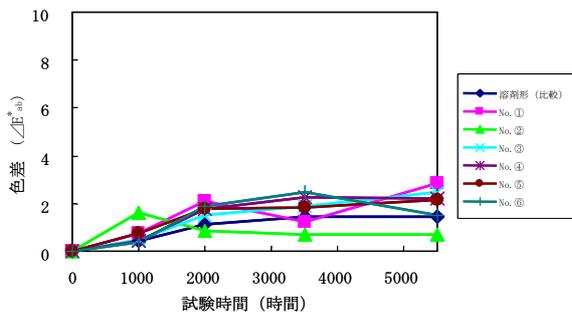


図-5. 4 促進耐候性試験における塗膜色差の経時変化

試験開始から2000時間の時点では、いずれの水性塗装系も溶剤形と差異の無い光沢保持率を示していたが、5500時間には一部の水性塗装系の光沢保持率が溶剤形よりもやや劣る結果となった。一方、塗膜の色差については、すべての水性塗装系で溶剤形と有意差のない結果となった。

塗膜の防食性を評価するために行った土研式複合サイクル腐食試験では、塗装系 B1 の一部の試験片において溶剤形よりもカット部の膨れ幅が大幅に大きかったが、大半の塗装系は溶剤形とほぼ同等の結果であった。また、いずれの試験板も一般部に異状は認められなかった。塗装系 B2 については、いずれも溶剤形とほぼ同等の結果となった。一方、JIS 式複合サイクル腐食試験では、塗装系 B1、B2 ともに一般部に異状は認められず、カット部の膨れ幅についても溶剤形とほぼ同等の結果であった。複合サイクル腐食試験後に行った塗膜の付着性試験では、水性塗装系 B2 においてやや低い付着強度となった（表-5. 4）。

表-5. 4 複合サイクル腐食試験後の付着性試験結果

塗装系 No.	土研式 400 サイクル	
	付着強度 (MPa)	破断箇所 (%)
B8 (比較: 溶剤形 C-5)	1.5	ジンク内: 100
B1	①	1.0 ジンク内: 30 下塗内: 70
	②	1.0
	③	2.0
	④	1.0
	⑤	1.0
	⑥	1.0
B2	①	0.5
	②	1.0
	③	0.5
	④	0.8
	⑤	1.0
	⑥	0.5

②塗膜の耐湿性および耐水性

耐湿潤冷熱繰返し性試験 10 サイクル後および耐湿性試験7日後の塗膜外観観察結果を表-5.5に示す。水性塗装系、溶剤形共に、異状は見られなかった。

③塗膜の環境遮断性および力学的特性

塗膜の環境遮断性（酸素透過性、透湿度）および力学的特性（破断強度、伸び率、応力緩和半減期）を試験した結果を表-5.6に示す。いずれの水性塗装系も、酸素透過係数および透湿度が溶剤形と差異のない結果であった。この結果から、水性塗料の環境遮断性は、溶剤形とほぼ同等であることが確認された。

一方、塗膜の引張破断強度および伸び率は、いずれの水性塗装系も溶剤形塗装系とほぼ同等となった。塗

膜の応力緩和半減期は塗装系 No. ②、④でやや長かったが、その他は溶剤形と差異のない結果でとなった。

表-5.5 耐水性試験後の塗膜外観観察結果

塗装系No.	耐湿潤冷熱 繰返し性試験 10 サイクル	耐湿性試験 7 日
B8 (比較: 溶剤形 C-5)	異常なし	異常なし
B1	①	異常なし
	②	異常なし
	③	異常なし
	④	異常なし
	⑤	異常なし
	⑥	異常なし
B2	①	異常なし
	②	異常なし
	③	異常なし
	④	異常なし
	⑤	異常なし
	⑥	異常なし

表-5.6 塗膜物性試験の結果

塗装系No.	酸素透過係数 ^a ($\times 10^{11}$)	透湿度 ($g/m^2 \cdot 24h$)	引張試験		応力緩和 半減期 (sec)	
			破断強度 (MPa)	破断時の 伸び率(%)		
B10 (比較)	5.58	0.44	25.0	5.4	900	
B4	①	0.20	0.49	23.8	8.4	150
	②	0.87	0.63	27.0	6.3	2910
	③	0.12	0.53	32.0	8.9	640
	④	0.69	1.84	30.1	5.0	9570
	⑤	0.23	0.79	19.1	10.9	130
	⑥	0.21	0.62	22.2	6.9	710

※ 酸素透過係数の単位: $cm^3(STP) \cdot cm/cm^2 \cdot sec \cdot cmHg$

以上、新設塗装用の提案水性塗装系について各種の塗膜性能試験を実施した。暴露試験や促進試験において、一部の水性無機ジンクリッチペイントの性能が溶剤形よりもやや劣っていたが、その他は溶剤形 C-5 塗装系とほぼ同等の性能であることが明らかとなった。

5.2.2 塗替用塗装系

① 塗膜の耐候性および防食性

屋外暴露試験では、これまでに暴露3年目までの結果が得られている。溶剤形塗装系、水性塗装系ともに、ジンクリッチペイントを適用した試験板に比べてジンクリッチペイントを適用していない試験板は、カット部からの膨れの進行が大きくなることが確認された。プラスト鋼板を使用した試験板について、水性塗装系の一部の試験板で膨れが発生した以外は、溶剤形塗料とほぼ同等の結果であった。一方、旧塗膜・さび混在塗装鋼板を素地調整して作製した試験板については、水性塗装系の一部の試験板でカット部近傍に著しい膨れを発生するものが見受けられたが、大半の水性塗装系は溶剤形とほぼ同等の結果となった。

屋外暴露前後の試験板について、塗膜のインピーダ

ンス測定を行った結果の一部を図-5.5に示す。全ての水性塗装系において、暴露試験前後ともに溶剤形とほぼ同等の静電容量および抵抗値となった。

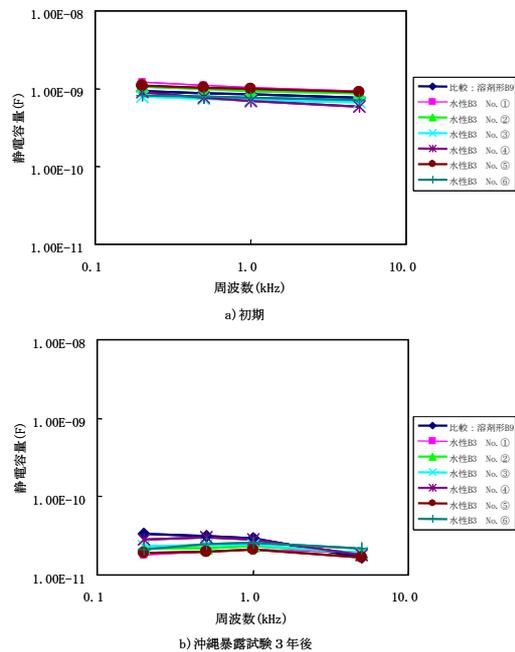


図-5.5 塗膜の静電容量の測定結果 (塗装系 B3)

塗膜の防食性を評価するために行った土研式複合サイクル腐食試験では、一部の試験板で溶剤形よりもカット部の膨れ幅が若干大きくなったが、大半の塗装系は溶剤形と同等であった。また、いずれの試験板も一般部に異常は認められなかった。複合サイクル腐食試験後に行った付着性試験では、いずれの水性塗装系の付着力も、溶剤形と同等以上となった (表-5.7)。

表-5.7 複合サイクル腐食試験後の付着性試験結果

塗装系 No.	土研式 400 サイクル	
	付着強 (MPa)	破断箇所 (%)
B9 (比較: 溶剤形 Rc-I)	0.5	ジンク内 : 100
B3	①	下塗内 : 60 下塗/中塗 : 40
	②	ジンク内 : 100
	③	ジンク内 : 90 接着剤/ドリ : 10
	④	下塗内 : 95 接着剤/ドリ : 5
	⑤	中塗/上塗 : 90 接着剤/ドリ : 10
	⑥	ジンク内 : 100
B10 (比較: 溶剤形 Rc-III)	3.5	下塗内 : 85 中塗内 : 15
B4	①	下塗内 : 50 接着剤/ドリ : 50
	②	下塗内 : 60 接着剤/ドリ : 40
	③	上塗/接着剤 : 80 接着剤/ドリ : 20
	④	下塗内 : 60 接着剤/ドリ : 40
	⑤	中塗内/上塗内 : 70 接着剤/ドリ : 30
	⑥	中塗/上塗 : 50 上塗/接着剤 : 40 接着剤/ドリ : 10

②塗膜の耐湿性および耐水性

耐湿潤冷熱繰返し性試験 10 サイクル後および耐湿性試験 7 日後の塗膜外観観察結果を表-5. 8 に示す。すべての供試塗装系で、異状は見られなかった。

表-5. 8 耐水性試験後の塗膜外観観察結果

塗装系No.	耐湿潤冷熱繰返し性試験 10 サイクル	耐湿性試験 7 日
B9 (比較: 溶剤形 Rc-I)	異状なし	異状なし
B3	①~⑥	異状なし
B10 (比較: 溶剤形 Rc-III)	異状なし	異状なし
B4	①~⑥	異状なし

以上の結果から、塗替塗装用の完全水性塗装系（素地調整程度 1 種、3 種）は共に、屋外暴露試験の一部の試験板で一般部に微細な膨れが観察されたが、大半の試験板では暴露試験、促進試験および塗膜特性試験において溶剤形の Rc-I 塗装系 Rc-III とそれぞれほぼ同等の性能が期待できることが明らかとなった。

6. 水性塗料の施工性に関する検討

塗装の施工では、各々の塗料の性質を把握し適切に取り扱うことが、形成される塗膜の性能を最大限に発揮させることに繋がる。特に塗替塗装の施工では、塗装面の状態、塗装時の環境や塗装後の気象変化など、塗装の良否に影響を与える要因が様々である。これらの状況下における水性塗料の適用性について知見を得るために、各種の試験を実施した。

6. 1 水性エポキシ樹脂塗料下塗の粘性挙動

水性エポキシ樹脂塗料下塗と溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗の粘性挙動を比較し、その結果から水性エポキシ樹脂塗料下塗の施工性について推測した。

6. 1. 1 試験方法

塗料の粘性の測定には、液体粘弾性測定装置 (HAAKE 社製) を使用した。センサーは、コーンプレート型センサーを使用した。試料には、測定直前に塗料液/硬化剤を混合した液を希釈 (無希釈、20%、40%) を用いた。ずり速度を 0.001~4500 (1/S) と徐々に変化させた時の試料の粘度、次に、低ずり速度 0.001 (1/S) ~ 高ずり速度 1000 (1/S) ~ 低ずり速度 0.001 (1/S) と変化させた時の試料の粘度をそれぞれ測定した。

6. 1. 2 試験結果

粘度-ずり速度曲線の一例を図-6. 1 および図-6. 2 に、粘度回復曲線の一例を図-6. 3 および図-6. 4 にそれぞれ示す。

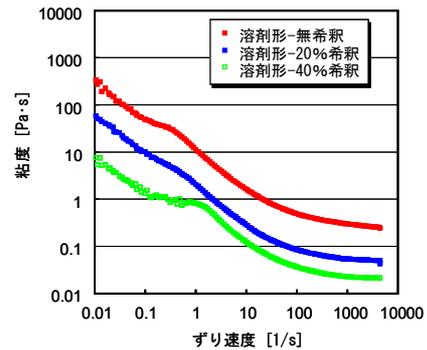


図-6. 1 溶剤形塗料の粘度-ずり速度曲線

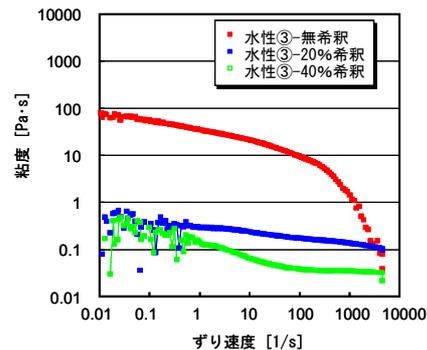


図-6. 2 水性塗料の粘度-ずり速度曲線

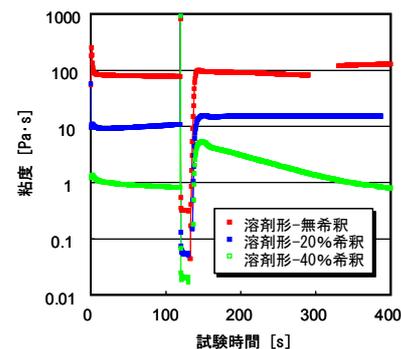


図-6. 3 溶剤形塗料の粘度回復曲線

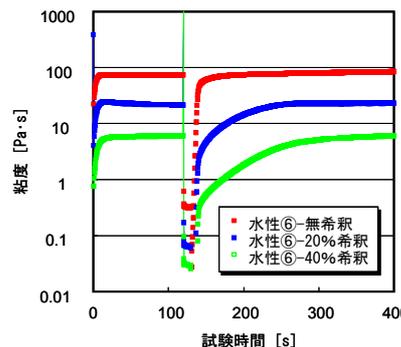


図-6. 4 水性塗料の粘度回復曲線

水性エポキシ樹脂塗料各種は、溶剤形に比較して低ずり速度域での粘度が小さかった。また、溶剤形は 20%、40% と希釈しても擬塑性挙動を維持するのに比較して、水性エポキシ樹脂塗料各種は希釈により擬塑性が失われニュートン流動に近づく傾向を示した。一方、高い

ずり速度を受けてからの粘度回復に関しては、溶剤形に比べて水性エポキシ樹脂塗料の方が緩やかであった。

以上のことから、水性エポキシ樹脂塗料は溶剤形に比べて、塗装時にたれが生じやすい傾向が推測される。

6. 2 塗装後における環境変化への適用性

塗料を塗装した直後に降雨や結露が起きた場合、特に冬季の気温が低い時などは塗膜表面に膨れが発生したり、白化したりすることがある。これは、乾燥が不十分で、未硬化の塗膜が水分の影響を受けたためである。水性塗料は冬季での乾燥が遅く、水分による影響は特に大きいと考えられる。施工後に降雨や結露が生じた場合を想定して、水性塗料施工時の環境変化への適用性を把握するための試験を行った¹⁾。

6. 2. 1 試験内容

磨軟鋼板（寸法 70 mm×150 mm×0.8 mm）を使用し、下塗試験用には鋼板を脱脂した面に、上塗試験用は各々の中塗を塗装した面に、それぞれ供試塗料を塗装した。下塗は乾燥膜厚 60 μm、上塗は 25 μm に相当する塗付量をはけ塗りし、規定の温度で規定時間養生し

た後、速やかに規定の温度の水道水を入れた容器に試験板を半没させ、直ちに容器を密閉した。2時間経過後に試験板を引き上げ、引き上げ直後および翌日に没水部（浸せき状態）、非没水部（結露状態）の塗膜に対し、目視評価（つや引け、変色、膨れ）、光沢・色差測定を行った。試験は下記の各塗料（色相はN-7.0近似）について実施した。

- ア) 水性エポキシ樹脂塗料下塗
- イ) 水性ふっ素樹脂塗料上塗
- ウ) 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗（比較）
- エ) 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗（比較）

塗膜の外観評価は下記の基準により行った。

- ◎：基準塗膜と同じ
- ：白化、ツヤひけ
- △：著しい白化、ツヤひけ
- ×：溶解、膨れ、しわ
- ××：溶出

6. 2. 2 試験結果

塗膜外観観察結果の一部を表-6. 1 および表-6. 2 に示す。

表-6. 1 塗膜外観観察結果（10℃、没水部）

塗料分類	供試塗料		引き上げ直後			引き上げ翌日		
	塗料種	塗料会社	塗装後浸せきまでの時間			塗装後浸せきまでの時間		
			3時間	5時間	16時間	3時間	5時間	16時間
下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	③	×	×	×	△	△	○
		④	○	×	○	○	×	◎
		⑤	××	××	××	××	××	××
		⑥	×	×	○	×	○	○
	(比較用) 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	○	○	○	○	○	○	
上塗	水性ふっ素樹脂塗料上塗	①	×	×	×	◎	◎	◎
		②	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		⑥	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		(比較用) 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	◎	◎	◎	◎	◎	◎

表-6. 2 塗膜外観観察結果（10℃、非没水部）

塗料分類	供試塗料		引き上げ直後			引き上げ翌日		
	塗料種	塗料会社	塗装後浸せきまでの時間			塗装後浸せきまでの時間		
			3時間	5時間	16時間	3時間	5時間	16時間
下塗	水性エポキシ樹脂塗料下塗	③	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		④	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		⑤	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		⑥	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	(比較用) 弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
上塗	水性ふっ素樹脂塗料上塗	①	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		②	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		⑥	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		(比較用) 弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	◎	◎	◎	◎	◎	◎

下塗塗料は没水部において、溶剤形塗料では白化、つや引け等の塗膜表面の変状であったのに対し、水性

塗料では塗装後短時間で塗膜が没水状態となった場合、塗膜の水への溶解や膨れ等、防食性能への影響が懸念

される現象が発生した試料もあった。この傾向は、10℃の低温環境において特に顕著であった。上塗塗料では、溶剤形塗料は塗膜変状が認められなかったのに対し、水性塗料は膨れの発生が確認された塗料もあった。一方、非没水部においては、一部の水性塗料で若干の白化、つや引けが認められた以外は、顕著な変状は認められなかった。以上の結果から、水性塗料は、塗装後短時間で降雨や結露により特に水が滞留した場合には、顕著な塗膜変状を生じる可能性があることが明らかとなった。

6. 3 施工環境への適用性

現場での塗装では、塗装対象鋼構造物の設置環境が様々であるため、温度、湿度などの環境条件の変化が大きい。このような種々の環境下で塗装された水性塗料の塗膜性能を評価し、その適用性を把握するための試験を行った¹¹⁾。

6. 3. 1 試験方法

塗替塗装を想定した塗装系 No. B4 (表-5. 3 参照) を試験に供した。比較には、溶剤形塗料の塗装系 No. B10 を供した。尚、上塗の色相は N-9.5 (白) とした。試験板はブラスト処理鋼板 (暴露試験用: 寸法 200 mm×300 mm×3.2 mm、促進試験用: 寸法 70 mm×150 mm×2.3 mm) に、下記環境下で供試塗装系をはけ塗装することにより作製した。

- ア) 標準環境: 23℃、50%RH
- イ) 高湿度環境: 23℃、90%RH 以上
- ウ) 低温環境: 5℃

試験板を屋外暴露試験 (沖縄県大宜味村、茨城県つくば市)、土研式複合サイクル腐食試験、耐湿試験に供し、経時にて塗膜外観観察を行った。また、屋外暴露試験では、経時で光沢値、色差、プルオフ法による付着性試験を実施した。初期の付着性試験は、塗装完了後 1 ヶ月間養生した時点で実施した。なお、屋外暴露試験および土研式複合サイクル腐食試験では、試験板の試験面の一部に鋼素地に達する傷を入れた。

6. 3. 2 試験結果

土研式複合サイクル試験においては、いずれの塗料も一般部に異状を認めず、付着性、カット部の膨れ幅についても塗装環境による有意差は認められなかった。

屋外暴露試験後の外観観察結果の一部を表-6. 3 に示す。沖縄暴露では、水性塗料系の④で高湿度環境塗装および低温環境塗装試験板の一般部に膨れが認められたが、他は異状が無かった。この供試塗装系では、高湿度環境塗装試験板が他環境塗装試験板に比べて、

光沢保持率の低下が若干大きかった。一方、つくば暴露では、いずれの塗料も塗装環境による有意差は認められなかった。

表-6. 3 屋外暴露試験後の外観観察結果 (沖縄暴露)

塗装環境	塗装系No.	1年		2年		
		一般部	カット部	一般部	カット部	
標準環境	B10	○	28 mm	○	35 mm	
	B4	④	○	9 mm	○	10 mm
		⑥	○	11 mm	○	12 mm
高湿度環境	B10	○	25 mm	○	55 mm	
	B4	④	膨れ 8F 2 mm	膨れ 8M 8 mm		
		⑥	○	2 mm	○	5 mm
低温環境	B10	○	32 mm	○	42 mm	
	B4	④	膨れ 8F 12 mm	膨れ 8M 20 mm		
		⑥	○	12 mm	○	20 mm

耐湿試験の結果を表-6. 4 に示す。耐湿試験に供した水性塗装系はいずれも、高湿度環境塗装の試験板で塗膜膨れが確認された。

表-6. 4 耐湿試験の結果

塗装系No.	耐湿試験 7日		
	標準環境 (23℃、50%RH)	高湿度環境 (23℃、90%RH)	低温環境 (5℃)
	外観評価	外観評価	外観評価
B10	○	○	○
B4	④	膨れ 4M	○
	⑥	膨れ 4M	○

以上の試験結果から、水性塗料の塗膜性能は塗装時における周辺環境の湿度の影響を大きく受けることが明らかとなった。

6. 4 塗替塗装における素地調整程度への適用性

鋼構造物の塗替塗装では、素地調整方法によっては一部に若干のさびが残存することもある。このような素地に対して水性塗料の適用性を把握するための試験を行った。

6. 4. 1 試験方法

塗替塗装を想定した塗装系 No. B4 (表-5. 3 参照) を試験に供した。比較には、溶剤形塗料の塗装系 No. B10 を供した。尚、上塗の色相は N-9.5 (白) とし、試験板の塗装は、はけ塗りとした。試験板は、ブラスト処理鋼板 (寸法 300 mm×200 mm×3.2 mm) を海浜地区で 4 ヶ月間暴露し、さび鋼板を作製した上で、このさび鋼板を動力工具、ワイヤブラシ、ペーパーを用いて程度の異なる素地に調整し作製した。試験に供した試験板の素地調整程度を以下に記す。

- ア) ブラスト処理鋼板: 素地調整 a (鋼道路橋塗装・防食便覧の素地調整程度 1 種相当)

- イ) さび鋼板のさびを動力工具で十分に除去：素地調整 b
(鋼道路橋塗装・防食便覧の素地調整程度 2 種相当)
- ウ) さび鋼板のさびを動力工具で軽く除去：素地調整 c
- エ) さび鋼板のさびをワイヤブラシで除去：素地調整 d
- オ) さび鋼板のさびをペーパーで軽く除去：素地調整 e

試験板は、試験面の一部に鋼素地に達する傷を入れた後、沖縄県大宜味村において屋外暴露に供した。所定の期間暴露後の試験板の塗膜に対し、プルオフ法による付着力の評価を実施した。なお、初期の付着性試験は、塗装完了から 1 ヶ月間養生した後にいった。

6. 4. 2 試験結果

付着性試験結果を表-6. 5 に示す。暴露後の試験板の塗膜外観には、素地調整 b~e において、溶剤形塗料も含めて一般部に塗膜膨れが認められた。暴露後の付着性試験で、水性塗料は素地調整 c~e でいずれの試験板もさび層内の破断が 100%であった。溶剤形塗料では、下塗内とさび層内の破断が混在した状態であることから、水性塗料は溶剤形塗料に比べてさび層への浸透性が低いと考えられる。

表-6. 5 付着性試験の結果

塗装系No.	項目	素地調整 a	素地調整 b	素地調整 c	素地調整 d	素地調整 e	
B10	破断面の写真						
	付着 (MPa)	7.0 以上	5.0	4.2	6.8	5.5	
	破断箇所 (%)	—	素地/下塗 : 5 下塗内 : 35 接着剤 : 60	さび層 : 30 下塗内 : 65 接着剤 : 5	さび層 : 70 下塗内 : 30	さび層 : 70 下塗内 : 25 接着剤 : 5	
B4	③	破断面の写真					
		付着 (MPa)	3.5	4.7	2.7	2.0	3.3
		破断箇所 (%)	接着剤 : 100	素地/下塗 : 40 接着剤 : 60	さび層 : 100	さび層 : 100	さび層 : 100
	④	破断面の写真					
		付着 (MPa)	3.0	2.0	2.5	2.0	3.8
		破断箇所 (%)	接着剤 : 100	素地/下塗 : 15 下塗/中塗 : 5 接着剤 : 80	さび層 : 100	さび層 : 100	さび層 : 100
	⑥	破断面の写真					
		付着 (MPa)	2.5	3.5	1.8	1.8	1.5
		破断箇所 (%)	接着剤 : 100	素地/下塗 : 60 接着剤 : 40	さび層 : 100	さび層 : 100	さび層 : 100

6. 5 水性無機ジンクリッチペイントの施工性

室内試験において水性無機ジンクリッチペイントの膜厚と乾燥条件 (湿度) を変えて割れ性と付着性とを確認した¹²⁾。

6. 5. 1 試験方法

水性無機ジンクリッチペイントおよび比較用の溶剤形無機ジンクリッチペイントをブラスト処理鋼板 (300mm×450mm×3.2mm) にエアスプレーで膜厚を薄膜から厚膜に変化 (傾斜塗り) させて塗付し、室内および高湿度条件 (水を入れた密閉容器) で塗膜を乾燥させた。乾燥後の塗膜外観について、割れ等の異状の有無を目視により観察した。また、プルオフ法や基盤目テープ法での塗膜の付着性評価も行った。なお、付

着性試験用試験板には、水性無機ジンクリッチペイントを乾燥させた後、さらにミストコート、水性エポキシ樹脂塗料下塗を塗り重ねた。比較用の溶剤形無機ジンクリッチペイントには溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗を塗装した。

6. 5. 2 試験結果

試験後の塗膜外観を表-6. 6 にまとめた。水性無機ジンクリッチペイントが標準膜厚 (75 μm) である場合には、乾燥条件が常温常湿、あるいは常温高湿度であっても塗膜外観に大きな異状はみられなかったが、厚膜 (例えば 160 μm 以上) になった場合には、塗膜に割れが発生したサンプルもみられた。また、乾燥条件の違いによるたれ限界膜厚には大きな差はみられなかつ

た。溶剤形無機ジンクリッチペイントと比較すると、水性無機ジンクリッチペイントは、たれ限界膜厚は低い傾向であった。常温常湿の乾燥条件で比較した場合には、水性無機ジンクリッチペイントは塗膜に割れが発生し易い傾向が認められた。水性無機ジンクリッチペイントは高湿度条件で養生された場合には常温常湿の条件に比べて、付着力は低い傾向があった。

表-6.6 試験後の塗膜外観

塗料No.	室内		高湿度			
	塗膜外観 (割れの有無)		たれ限界 膜厚 (μm)	塗膜外観 (割れの有無)		たれ限界 膜厚 (μm)
	標準膜厚 ($75\mu\text{m}$)	厚膜		標準膜厚 ($75\mu\text{m}$)	厚膜	
①	無	無	130	無	無	150
②	無	無	120	無	無	150
③	無	無	150	無	有 (243)*	190
④	無	有 (115)*	160	無	有 (200)*	200
⑤	無	有 (160)*	338	無	有 (194)*	280
⑥	無	無	90	無	無	70
溶剤形	無	無	210	無	有 (150)*	180

*: () は割れが発生した乾燥膜厚を示す。

6.6 水性塗料の厚塗り性

水性有機ジンクリッチペイントおよび水性エポキシ樹脂塗料の厚塗り性(たれ性)を室内試験で確認した。

6.6.1 試験方法

水性有機ジンクリッチペイントおよび水性エポキシ樹脂塗料を、リオン粘度計での粘度が $2.0\sim 2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ になるように水で希釈調整した後、みがき軟鋼板にサグテスターを用いて塗布した。サグテスターの例を図-6.5、試験の手順を図-6.6に示す。

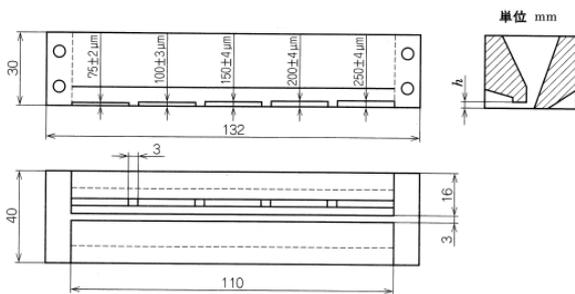


図-6.5 サグテスターの一例

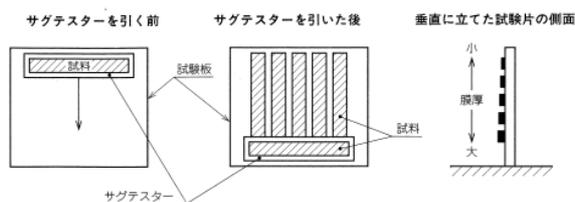


図-6.6 試験の手順

塗付後、標準養生 (23°C 、 $50\%\text{RH}$)、および高湿度養生 (23°C 、 $90\%\text{RH}$) の条件下で試験板を垂直に保ち乾燥させ、塗膜のたれ性を評価した。なお、たれ性の評価は、JIS K5551:2008 構造物用さび止めペイント 7.9 たるみ性に準拠して行った。

6.6.2 試験結果

試験結果を表-6.7および表-6.8に示す。

表-6.7 水性有機ジンクリッチペイントの厚塗り性

供試塗料No.	①	②	③	④	⑤	⑥	溶剤形	
希釈率 (%)	8	7	1	2	3	3	4	
粘度 ^{*1}	2.2	2.0	2.2	2.4	2.1	2.2	1.5	
粘度 (6rpm) ^{*2}	7.2	4.1	11.4	7.3	5.0	15.0	9.2	
粘度 (60rpm) ^{*2}	2.9	1.8	3.3	2.8	2.6	2.6	1.3	
TI値 ^{*3}	2.5	2.3	3.5	2.6	1.9	5.8	7.1	
標準養生	たれ限界膜厚(μm)	316	40	314以上	56	66	105	150
高湿度養生	たれ限界膜厚(μm)	307以上	43	308以上	62	67	84	216

表-6.8 水性エポキシ樹脂塗料の厚塗り性

供試塗料No.	①	②	③	④	⑤	⑥	溶剤形	
希釈率 (%)	13	8	3	3	5	13	8	
粘度 ^{*1}	2.4	2.2	2.5	2.3	2.0	2.4	0.4	
粘度 (6rpm) ^{*2}	10.2	4.7	10.0	11.2	5.3	13.3	1.45	
粘度 (60rpm) ^{*2}	2.9	2.4	2.6	3.0	2.5	1.9	0.36	
TI値 ^{*3}	3.5	2.0	3.8	3.7	2.1	7.1	4	
標準養生	たれ限界膜厚(μm)	130	44	107	75	63	88	100
高湿度養生	たれ限界膜厚(μm)	153	44	102	75	62	79	118

*1: リオン粘度計で測定した塗料粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

*2: B型粘度計で回転数 6rpm, または 60rpm の条件で測定した塗料粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

*3: チクソトロピーインデックス、TI 値=6rpm での測定粘度/60rpm での測定粘度。TI 値が高いほどたれ限界膜厚が大きくなる傾向にある。

水性有機ジンクリッチペイントは溶剤形有機ジンクリッチペイントに比べて、たれ限界膜厚が低いものもみられたが、溶剤形と同等以上のたれ限界膜厚であった水性有機ジンクリッチペイントもあった。たれ限界膜厚が乾燥膜厚 $75\mu\text{m}$ 以下であるものはエアレスプレー塗装で目標膜厚 $75\mu\text{m}$ とした場合には、たれ易いと推定される。一方、水性エポキシ樹脂塗料に関する結果では、溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗と同等以上のたれ限界膜厚をもつサンプルもあった。たれ限界膜厚が $60\mu\text{m}$ 程度の場合には、目標乾燥膜厚 $60\mu\text{m}$ として塗装された場合には、たれ易いと予想される。

以上の試験結果から、水性塗料全般の特徴として、低温や高湿度の条件においては乾燥しにくく、塗膜形成する前に降雨の影響や結露が起こると白化やつや引け等の塗膜表面の変状が起こり、さらに塗膜の流出、膨れ等の防食性能への影響が懸念される現象が起こる可能性があることが明らかとなった。また、低温や高

湿度の条件下では塗料がたれる現象が起こり易いことも確認された。さらに、水性塗料の施工では、素地調整におけるさびの除去が、溶剤形塗料に比べてより重要であることが明らかとなった。

7. VOC 削減暫定塗装仕様の提案と環境負荷低減性の評価

7. 1 河川鋼構造物塗装の VOC 削減暫定塗装仕様

無溶剤形エポキシ樹脂塗料および低溶剤形エポキシ樹脂塗料の河川鋼構造物塗装への適用について検討した結果、無溶剤形エポキシ樹脂塗料は施工性の観点から現場での塗替塗装に適用することは現状では困難で

あり、現場における塗替塗装の VOC 削減を早期に実現するためには、低溶剤形エポキシ樹脂塗料を適用するのが妥当であることが明らかとなった。そこで、低溶剤形塗料の施工性や塗膜性能について検討した結果に基づき、従来の溶剤形エポキシ樹脂塗料を低溶剤形エポキシ樹脂塗料に置き換えた、河川鋼構造物塗装の VOC 削減塗装仕様を提案する。水中部仕様を表-7. 1 に、大気部仕様を表-7. 2、7. 3 に示す。なお、水中部仕様の素地調整程度 3 種での塗替は、河川鋼構造物の長寿命化の観点から VOC 削減塗装仕様は設定しないこととした。

表-7. 1 水中部仕様（素地調整程度 1 種）（VOC 削減率 50%程度）

工程	従来の溶剤形塗装系		VOC 削減提案塗装仕様			
	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚)	VOC 量 (g/m ²)	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚, 塗装方法)	塗り重ね時間 (23℃)	VOC 量 (g/m ²)	VOC 削減率 (%)
素地調整	1 種					
1 層目	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm)	72	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm, はけ・ローラー) (700 g/m ² , 75μm エアレス)	1日～10日	72	0
2 層目	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm)	72	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm, はけ・ローラー)	1日～10日	72	0
3 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240g/m ² , 60μm)	96	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (350g/m ² , 120μm, はけ・ローラー) (460g/m ² , 120μm, エアレス)	1日～10日	63	67.2
4 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240g/m ² , 60μm)	96	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (350g/m ² , 120μm, はけ・ローラー) (460g/m ² , 120μm, エアレス)	—	63	
5 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240g/m ² , 60μm)	96	—	—	—	—
6 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (水中部用) (240g/m ² , 60μm)	96	—	—	—	—
合計		528			270	48.9

※エアレススプレー塗装の時は、有機ジンクリッチペイントは 75μm/回とする。

表-7. 2 大気部仕様（素地調整程度 1 種）（VOC 削減率 50%程度）

工程	従来の溶剤形塗装系		VOC 削減提案塗装仕様			
	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚)	VOC 量 (g/m ²)	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚, 塗装方法)	塗り重ね時間 (23℃)	VOC 量 (g/m ²)	VOC 削減率 (%)
素地調整	1 種					
1 層目	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm)	72	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm, はけ・ローラー) (700 g/m ² , 75μm エアレス)	1日～10日	72	0
2 層目	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm)	72	有機ジンクリッチペイント (300g/m ² , 37.5μm, はけ・ローラー)	1日～10日	72	0
3 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240g/m ² , 60μm)	88.8	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (350g/m ² , 120μm, はけ・ローラー) (460 g/m ² , 120μm, エアレス)	1日～10日	76	57.2
4 層目	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240g/m ² , 60μm)	88.8	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (180g/m ² , 40μm, はけ・ローラー) (240 g/m ² , 40μm, エアレス)	1日～10日	9.8	86.0
5 層目	ふっ素樹脂塗料用中塗 (189g/m ² , 40μm)	70.2	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (140g/m ² , 30μm, はけ・ローラー) (180 g/m ² , 30μm, エアレス)	—	8.4	87.2
6 層目	ふっ素樹脂塗料上塗 (140g/m ² , 30μm)	65.8	—	—	—	—
合計		457.6			238.2	47.9

※エアレススプレー塗装の時は、有機ジンクリッチペイントは 75μm/回とする。

表-7.3 大気部仕様（素地調整程度3種）（VOC削減率70%程度）

工程	従来の溶剤形塗装系		VOC削減提案塗装仕様			
	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚)	VOC量 (g/m ²)	塗料一般名 (標準使用量, 参考膜厚, 塗装方法)	塗り重ね時間 (23℃)	VOC量 (g/m ²)	VOC削減率 (%)
素地調整	3種		3種			
補修 塗装	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120g/m ² , 30μm)	44.4	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (120g/m ² , 一, はけ・ローラー)	4時間以内	16	64.0
1層目	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240g/m ² , 60μm)	88.8	低溶剤形エポキシ樹脂塗料 (350g/m ² , 120μm, はけ・ローラー) (460g/m ² , 120μm エアレス)	1日~10日	76	57.2
2層目	変性エポキシ樹脂塗料 (大気部用) (240g/m ² , 60μm)	88.8	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 (180g/m ² , 40μm, はけ・ローラー) (240g/m ² , 40μm, エアレス)	1日~10日	9.8	86.0
3層目	ふっ素樹脂塗料用中塗 (180g/m ² , 40μm)	70.2	水性ふっ素樹脂塗料上塗 (140g/m ² , 30μm, はけ・ローラー) (180g/m ² , 30μm, エアレス)	—	8.4	87.2
4層目	ふっ素樹脂塗料上塗 (大気部用) (140g/m ² , 30μm)	65.8	—	—	—	—
合計	358		110.2 69.2			

表-7.1~7.3には、従来の溶剤形塗装系およびVOC削減提案塗装系それぞれについて、工程ごとに算出したVOC排出量の代表値も示してある。この数値は、各工程における最大希釈率を考慮して求めた。計算の結果から、低溶剤形エポキシ樹脂塗料を適用した河川鋼構造物塗装のVOC削減提案塗装仕様では、水中部用で50%程度、大気部用（素地調整程度1種）で50%程度、大気部用（素地調整程度3種）で70%程度VOCが削減できることが明らかとなった。

7.2 道路橋塗装のVOC削減暫定塗装仕様

鋼道路橋塗装への水性塗料の適用性について検討した結果、水性無機ジンクリッチペイントは施工性の観点から現状での適用は困難であることが明らかとなっ

た。そこで、新設用塗装仕様として、無機ジンクリッチペイントのみ溶剤形塗料を適用した鋼道路橋塗装のVOC削減塗装仕様を提案し、表-7.4に示す。

一方、水性有機ジンクリッチペイントは溶剤形ジンクリッチペイントとほぼ同等の性能を示し、溶剤形と置き換え可能であることが明らかとなった。そこで、鋼道路橋の塗替用塗装仕様（素地調整程度1種）として、水性有機ジンクリッチペイントを適用したVOC削減塗装仕様を提案し、表-7.5に示す。また、塗替用塗装仕様（素地調整程度3種）として表-7.6のVOC削減塗装仕様を提案する。ただし、水性有機ジンクリッチペイントや水性エポキシ樹脂塗料の膜厚および使用量については、今後の検討結果により最終的な設定をするものとする。

表-7.4 新設塗装VOC削減暫定提案塗装仕様（スプレー塗装）

	便覧C-5 塗装系		VOC削減暫定提案塗装仕様		塗装間隔
	塗料一般名、参考膜厚（標準使用量）	VOC量(g/m ²)	塗料一般名、参考膜厚（標準使用量）	VOC量(g/m ²)	
素地調整程度	プラスト処理		ISO Sa2 1/2		4時間以内
防食下地	無機ジンクリッチペイント 75μm(600g/m ²)	180	無機ジンクリッチペイント 75μm(600g/m ²)	180	1日~10日
ミスト コート	エポキシ樹脂塗料下塗 —(160g/m ²)	147.2	水性エポキシ樹脂塗料下塗 —(160g/m ²)	1.6	1日~10日
下塗 1層目	エポキシ樹脂塗料下塗 120μm(540g/m ²)	280.8	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40μm(200g/m ²)	4.8	1日~10日
下塗 2層目	—	—	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40μm(200g/m ²)		1日~10日
下塗 3層目	—	—	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40μm(200g/m ²)		1日~10日
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗 30μm(170g/m ²)	88.4	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30μm(170g/m ²)	1.7	1日~10日
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗 25μm(140g/m ²)	78.4	水性ふっ素樹脂塗料上塗 25μm(140g/m ²)	4.2	
合計	—	774.8	—	192.3	
VOC削減率	—	—	—	75.2%	

注) VOC削減暫定提案塗装仕様の膜厚および使用量は暫定数値とする。

表-7.5 塗替塗装 VOC 削減暫定提案塗装仕様 (素地調整程度 1 種、スプレー塗装)

素地調整程度	便覧 Rc-I 塗装系		VOC 削減暫定提案塗装仕様		塗装間隔
	塗料一般名、参考膜厚 (標準使用量)	VOC 量 (g/m ²)	塗料一般名、参考膜厚 (標準使用量)	VOC 量 (g/m ²)	
素地調整程度	1 種				4 時間以内
防食下地	有機ジンクリッチペイント 75 μm (600g/m ²)	156.0	水性有機ジンクリッチペイント 37.5 μm (300g/m ²)	2.4	1 日～10 日
			水性有機ジンクリッチペイント 37.5 μm (300g/m ²)	2.4	1 日～10 日
下塗 1 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)	117.6	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40 μm (200g/m ²)	1.6	1 日～10 日
下塗 2 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (240g/m ²)	117.6	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40 μm (200g/m ²)	1.6	1 日～10 日
下塗 3 層目	—	—	水性エポキシ樹脂塗料下塗 40 μm (200g/m ²)	1.6	1 日～10 日
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)	85.0	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (170g/m ²)	1.7	1 日～10 日
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)	79.8	水性ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (140g/m ²)	4.2	1 日～10 日
合計	—	556.0	—	15.5	
VOC 削減率	—	—	—	97.2%	

注) VOC 削減暫定提案塗装仕様の膜厚および使用量は暫定数値とする。

表-7.6 塗替塗装 VOC 削減暫定提案塗装仕様 (素地調整程度 3 種、はけ・ローラー塗装)

素地調整程度	便覧 Rc-III 塗装系		VOC 削減暫定提案塗装仕様		塗装間隔
	塗料一般名、参考膜厚 (標準使用量)	VOC 量 (g/m ²)	塗料一般名、参考膜厚 (標準使用量)	VOC 量 (g/m ²)	
素地調整程度	3 種				4 時間以内
下塗 1 層目 (鋼材露出部)	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	78.0	水性エポキシ樹脂塗料下塗 45 μm (180g/m ²)	1.5	1 日～10 日
下塗 2 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	78.0	水性エポキシ樹脂塗料下塗 45 μm (180g/m ²)	1.5	1 日～10 日
下塗 3 層目	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗 60 μm (200g/m ²)	78.0	水性エポキシ樹脂塗料下塗 45 μm (180g/m ²)	1.5	1 日～10 日
下塗 4 層目	—	—	水性エポキシ樹脂塗料下塗 45 μm (180g/m ²)	1.5	1 日～10 日
中塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (140g/m ²)	56.0	水性ふっ素樹脂塗料用中塗 30 μm (140g/m ²)	1.4	1 日～10 日
上塗	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (120g/m ²)	56.4	水性ふっ素樹脂塗料上塗 25 μm (120g/m ²)	3.6	1 日～10 日
合計	—	346.4	—	11.0	
VOC 削減率	—	—	—	96.8%	

注) VOC 削減暫定提案塗装仕様の膜厚および使用量は暫定数値とする。

表-7.4～7.6 には「鋼道路橋塗装・防食便覧」C-5、Rc-I、Rc-III 塗装系と、それぞれに対応する VOC 削減提案塗装系について、工程ごとに算出した VOC 排出量の代表値が示してある。この数値は、「鋼道路橋塗装・防食便覧」に規定されているエアレス塗装での最大希釈率を適用し算出した。VOC 排出量の計算結果から、C-5 塗装系に対応する、無機ジンクリッチペイントのみ溶剤形塗料を適用した新設用提案塗装系では、およそ 70% の VOC が削減できることが明らかとなった。また、Rc-I 塗装系、Rc-III 塗装系に対応するそれぞれの塗替用提案塗装系では、いずれもおよそ 90% の VOC 削減が期待できることが明らかとなった。

8. まとめ

本研究では、土木鋼構造物塗装における VOC の大幅

な削減を実現するために、無溶剤形塗料および低溶剤形塗料の河川鋼構造物塗装への適用、水性塗料の鋼道路橋塗装への適用、さらにはこれらの塗料を適用した塗装系の環境負荷低減性について検討した。得られた結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 無溶剤形エポキシ樹脂塗料は常温以上では可使時間が短く、また、低温では粘度が高く塗膜の硬化乾燥も遅いことから、河川鋼構造物の現場での塗替塗装に適用することは現状では困難である。ただし、新設用工場塗装と、小型水門などの塗替塗装において工場に搬入して塗装する場合は、適用が可能である。

(2) 低溶剤形エポキシ樹脂塗料は無溶剤形エポキシ樹脂塗料よりも施工性は良好であり、河川鋼構造物の現場塗替においても、はけやローラーによる塗装が可能である。ただし、従来の溶剤形エポキシ樹脂塗料と

比べて可使時間が短いことや、仕上がり外観がやや劣ることは、塗料の配合上、現状では避けられない。

(3) 無溶剤形エポキシ樹脂塗料および低溶剤形エポキシ樹脂塗料は共に、従来の溶剤形エポキシ樹脂塗料と同等の塗膜性能を有するものと期待される。ただし、厳しい腐食環境である河川環境における長期間の耐久性については、本研究期間内では十分に確認されておらず、今後も引き続き検証する必要がある。

(4) 水性塗料を適用した提案塗装系は、新設塗装系および塗替塗装系のいずれにおいても、溶剤形塗料による従来塗装系とほぼ同等の塗膜性能を有するものと期待される。ただし、防食性や耐候性などの長期耐久性については、本研究で得られたデータのみでは結論が出せないため、今後も引き続き検証する必要がある。

(5) 水性塗料は低温や高湿度環境下では乾燥しにくいいため、塗膜形成する前に降雨や結露が起ると、白化やつや引け等の塗膜表面の変状や、さらには塗膜の流出や膨れなど、防食性能への影響が懸念される現象も起こる可能性がある。また、水性塗料は厚膜になるとたれ易い傾向にあり、低温や高湿度環境下で特に著しい。さらに、水性塗料は溶剤形塗料と比べてさび層への浸透性が低いと考えられる。さびの除去が不十分であると残存さび層が脆弱層となり、防食性に影響を及ぼす。

(6) 低溶剤形塗料および水性塗料の塗膜性能や施工性に関する検討結果にもとづき、VOC 削減塗装仕様を提案した。低溶剤形エポキシ樹脂塗料を適用した河川鋼構造物塗装の VOC 削減提案塗装仕様では、水中部用で 50%程度、大気部用で 50~70%程度の VOC が削減できる。また、水性塗料を適用した鋼道路橋塗装の VOC 削減提案塗装仕様では、新設用で 70%程度、塗替用で 90%程度の VOC を削減できる。

今後は、暴露試験を継続して VOC 削減塗装系の長期耐久性について引き続き検討するとともに、全国各地で試験的な施工を実施して現場での塗装作業性について検証を重ね、塗装作業性などのさらなる改善を図りたい。

参考文献

- 1) TEMPLE C. PATTON : 「塗料の流動と顔料分散」、共立出版、370p.、1971 年 5 月
- 2) 西崎到、守屋 進、富山禎仁、浜村寿弘、後藤宏明、木村武久、内藤義巳、大山博昭、齋藤 誠、中村宏之、藤

城正樹、山本基弘、松本剛司 : 「土木研究所共同研究報告書第 411 号 鋼構造物塗装の VOC (揮発性有機化合物) 削減に関する共同研究報告」、360p.、2010 年 12 月

- 3) 長谷川謙三 : 「早わかり 塗料と塗装技術」、日本理工出版会、p. 94、2001 年 11 月
- 4) 社団法人日本道路協会 : 「鋼道路橋塗装・防食便覧」、丸善、2005 年 12 月
- 5) 藤城正樹、後藤宏明、内藤義巳、山本基弘、斉藤 誠、富山禎仁 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(II)-無溶剤形塗料の適用性検討(その 1)-」、第 31 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 11-16、2008 年 10 月
- 6) 藤城正樹、後藤宏明、内藤義巳、山本基弘、斉藤 誠、富山禎仁 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(II)-無溶剤形塗料の適用性検討(その 2)-」、第 33 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 57-68、2010 年 10 月
- 7) 富山禎仁、西崎 到、奥 俊治、藤城正樹、半田雅紀、平井陽一、船山嘉実、金井浩一 : 「暴露試験による河川鋼構造物用塗料の性能評価」、防錆管理、第 51 巻、第 9 号、pp. 469-476、2007 年 9 月
- 8) 山本基弘、後藤宏明、内藤義巳、斉藤 誠、木村武久、中村宏之、守屋 進 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(I)-水性塗料の適用性検討(その 1)-」、第 31 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 1-10、2008 年 10 月
- 9) 山本基弘、守屋 進、後藤宏明、内藤義巳、斉藤 誠、木村武久、中村宏之 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討-水性塗料の適用性検討-」、防錆管理、第 53 巻、第 7 号、pp. 249-259、2009 年 7 月
- 10) 山本基弘、守屋 進、後藤宏明、大山博昭、斉藤 誠、木村武久、中村宏之 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(I)-水性塗料の適用性検討(その 4)-」、第 33 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 1-12、2010 年 10 月
- 11) 木村武久、守屋 進、山本基弘、後藤宏明、大山博昭、齋藤 誠、中村宏之 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(I)-水性塗料の適用性検討(その 5)-」、第 33 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 13-22、2010 年 10 月
- 12) 中村宏之、守屋 進、山本基弘、後藤宏明、大山博昭、斉藤 誠、木村武久 : 「鋼構造物塗装の VOC 削減に関する検討(I)-水性塗料の適用性検討(その 2)-」、第 32 回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、pp. 107-116、2009 年 10 月

A Study on Reduction of VOC Emission in Steel Structures Painting

Budget: Grants for operating expenses

Research Period: FY2006-2010

Advanced Materials Research Team

Nishizaki, I., Moriya, S. and Tomiyama, T.

Summary In this study, we researched corrosion protection performance and painting workability of solventless paints and water-based paints to apply them to steel structures painting in order to reduce the amount of VOC (volatile organic compound) emission. Performance evaluation tests, outdoor exposure tests, painting workability tests, etc. were carried out for these paint systems and the VOC reduction effect with each paint system was assessed. Main results are as follows. (1) It is difficult to adopt solventless paints for the painting of steel river structures since they are inferior to solvent-based paints in the painting workability under present situation. Therefore, it is necessary to utilize high-solid paints instead of solventless paints in order to reduce the amount of VOC in painting such structures. (2) Although water-based paints are easily influenced by ambient temperature and humidity compared with solvent-based paints, they demonstrate good performance almost same as solvent-based paints if appropriately painted. (3) Based on the results of performance evaluation tests, outdoor exposure tests, painting workability tests, etc., we suggested "Coating Specification with High-solid Paint System for River Structures" and "Coating Specification with Water-based paint System for Road Bridges", respectively. (4) The amount of VOC use in painting operation for high-solid paints system is 30-50% of solvent-based paints system and that for water-based paints system is 10-30%.

Key words: solventless paint, water-based paint, steel structures painting, VOC reduction, painting workability