

塗膜形成過程における施工条件が防食性に及ぼす影響

Influence of Construction Conditions in the Coating Film Formation Process on the Corrosion Resistance

塗料事業部門
建築・構造物塗料事業部
構造物塗料テクニカルサポートグループ
Paint Operating Division,
Architectural and Protective
Coatings Department
Protective Coating
Technical Support Group



清水 悠平
Yuhei SHIMIZU



宮下 剛
Tsuyoshi MIYASHITA

技術開発部門 開発部
技術開発第一グループ
Technical Development
Division,
Technology Development
Department
Technical Development
Group 1



田辺 知浩
Tomohiro TANABE

要 旨

高度経済成長期を中心に、日本国内では社会基盤として膨大な数の公共構造物が建設され、現代においてもその多くが供用され続けている。長大橋に代表される公共構造物は今後益々高齢化が進むことから、適切な維持管理、特に塗り替え塗装による長寿命化が強く求められている。近年、塗料材料面および施工面での技術開発が進み、Rc-I塗装系を代表とする長期耐久性を有する塗装仕様の適用により、公共構造物は長寿命化対応を果たしつつある。しかしながら、塗料は適切に塗装され正常な塗膜を形成し初めて本来有する性能を発揮する材料であることから、塗膜の耐久性に対しては施工品質の良否による影響が大きい。そのため、塗膜の耐久性を低下させる施工上の要因を特定し、これらを適切に管理していくことが重要である。

そこで著者らは、塗膜の耐久性(特に防食性)に対して影響を及ぼす施工上のエラー因子を特定し、現地塗り替え塗装における施工品質を向上させることを目的として、種々の施工エラーを含む試験片を意図的に作製し、屋外暴露試験に供した。回収した試験片の塗膜変状の評価や電気化学的手法を用いた解析を行うことで、塗膜の耐久性に対して影響を及ぼす施工上のエラー因子とその影響度を明らかにすることができたため、本報において結果を報告する。

Summary

From a period of high economic growth to 1980s, a vast numbers of public structures as a social infrastructure were built and today it has been used in Japan. Public structures as represented by bridge become older, requiring an adequate management, in particular lifelong duration by repainting. However, repainting of established constructions is mainly in site, concerning decrease of lifetime and film performance deterioration caused by construction error.

The author identified factor of construction error that has effect on long-term durability of film, intended to improve construction quality in site, making test piece of various types of construction errors and conduct exposure test. The research clarified the effect of construction error on durability of film and influence rate of it by evaluation of film and electrochemical assay. This report describes the results.

1. はじめに

道路橋は、高度経済成長期に建設されたものが現在供用中の全橋の約4割を占めている。そのうち建設後50年を経過するものが2016年度には約20%、2026年度には47%まで達すると推計されている¹⁾。これらの高齢化した社会資本を全て取り壊し、新たに建設し直すことは今日の日本の財政事情から現実的ではないことから、これらのインフラストックを延命し、長期にわたり維持管理していくことが重要な課題である。

これら大型鋼構造物の維持管理の手段として、効果的かつ経済的な側面から塗り替え塗装が幅広く適用されており、LCC(ライフサイクルコスト)の低減を目的として、塗料に対しては長期耐久性が求められている。しかしながら、供用中の鋼構造物の塗り替え塗装は、現地での施工が主となることから、施工上のエラーに起因する塗膜の早期劣化を生じる可能性があり、塗膜の耐久性は施工品質の良否による影響が大きい。

そこで著者らは、塗膜の耐久性に対して影響を与える施工因子の特定を目的として、種々の施工エラーを含む試験片を意図的に作製し、沖縄県伊計島での屋外暴露試験に供した。3年間の屋外暴露試験の後、回収した試験片の塗膜変状の評価や電気化学的手法を用いた解析を行うことで、塗膜の耐久性に対して影響を及ぼす施工因子を特定するとともに、各因子の影響度を明らかにすることができたため、本報において結果を報告する。

2. 実験

2.1 試験片の作製

2.1.1 試験片作製方法

寸法150×300×t3.2mmのブラスト処理鋼板に対して、有機ジンクリッチペイント75 μ mを半面(150×150mm)のみスプレー塗装し、23°C/50%RH環境下にて24時間養生した。その後、試験片全面に対して弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗60 μ mを24時間間隔で2層スプレー塗装した。塗装完了後、試験片の裏面および端部を同様の塗装仕様にて塗り包み、屋外暴露試験の評価結果に対して影響を及ぼさない状態とした。有機ジンクリッチペイントを塗装した面に対して、鋼材まで達する傷を施したものを試験片とした。試験に供した塗装仕様を表1にまとめる。

2.1.2 検証因子

試験片作製時における検証因子を表2に示す。なお、検証因子「A.端部処理」の試験片(No.2)のみ、塗膜の一部を意図的にはく離し鋼材を露出させた状態で試験に供した。塗装完了後の試験片(No.2)を図1に示す。また、検証因子「E.有機ジンクリッチペイント塗装方法」の試験片(No.9)に関して、意図的にスプレーダストを生じさせた有機ジンクリッチペイントの塗膜外観を図2に示す。

表1 供試塗装仕様

工 程	塗料名	塗装方法	塗装膜厚	塗装範囲	塗装間隔
防食下地	有機ジンクリッチペイント	スプレー	75 μ m	半面	—
下塗り第一層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー	60 μ m	全面	24時間
下塗り第二層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	スプレー	60 μ m	全面	24時間
					—

表2 検証因子と供試試験片一覧

種 別	概 要	詳 細	試験片 No.
A. 端部処理	標準条件	同一塗装仕様にて均一に塗り包む	No.1
	不十分	標準条件にて処理した後、一部をはく離し鋼材を露出	No.2
B. 基材素地調整方法	標準条件	グリッドブラスト処理、Rzjis=25 μ m	No.1
	粗さ変更	グリッドブラスト処理、Rzjis=50 μ m	No.3
	研削材変更	サンドブラスト処理、Rzjis=25 μ m	No.4
C. 基材酸化状態	標準条件	試験片開封後速やかに塗装実施	No.1
	軽度の酸化	23°C/50%RH環境下で3日間放置	No.5
	重度の酸化	蒸留水を散水し23°C/50%RH環境下で3日間放置	No.6
D. 塗料希釈量	標準条件	防食下地希釈率=10%、下塗希釈率=15%	No.1
	防食下地過希釈	防食下地希釈率=20%	No.7
	下塗過希釈	下塗希釈率=25%	No.8
E. 有機ジンクリッチペイント 塗装方法	標準条件	スプレー/試験片間距離=30cm	No.1
	スプレーダスト	スプレー/試験片間距離=60cm	No.9
F. 塗膜養生期間	標準条件	23°C/50%RH環境下にて9日間養生し傷施工	No.1
	短期養生	同環境下で16時間養生し傷施工	No.10
	長期養生	同環境下で30日間養生し傷施工	No.11
G. 傷施工方法	標準条件	鋼材に達する傷を1回施工	No.1
	複数回施工	標準条件の傷を同一箇所にて3回繰返し施工	No.12

標準試験片 (No.1)

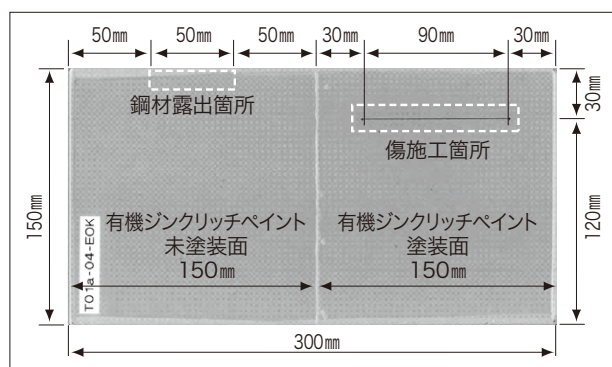


図1 塗装完了後の試験片 (No.2)

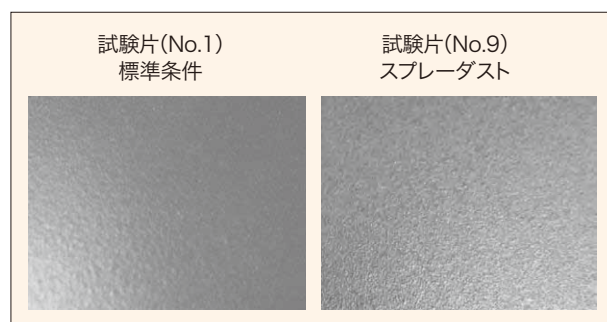


図2 有機ジンクリッチペイントの塗膜外観

2.2 試験方法

作製した試験片は、当社沖縄県伊計島暴露施設にて3年間の屋外暴露試験に供した。なお、暴露位置は海岸から約10mの厳しい腐食環境であり、試験片は地面と水平に設置した。試験片の暴露試験実施状況を図3に示す。

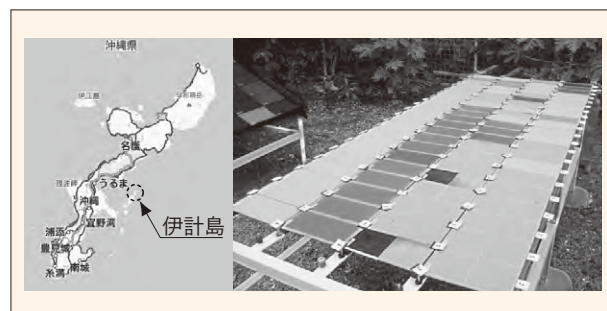


図3 試験片暴露状況

2.3 評価方法

供試後1年経過ごとに、目視による塗膜変状(さび・膨れ)観察を行った。一般部の塗膜変状をJIS K 5600-8-2(膨れ)、JIS K 5600-8-3(さび)に準じて評価し、傷部の塗膜変状を傷部からのさび幅および膨れ幅にて評価した。

試験開始から3年間経過後、試験片を回収し、変状の著しい一部の試験片に関して、カレントインタラプタ法(以下C I法と称す)による分極抵抗値の測定、およびデジタルマイクロスコープ(以下DMSと称す)による傷部断面の観察を行った。

3. 結果と考察

3.1 塗膜変状観察結果

供試後1年経過ごとの塗膜変状を観察した結果を表3に示す。

いずれの試験片に関しても、一般部における塗膜の変状は認めなかった。また、傷部に関しても外観上のさびの進行は認めず、塗膜膨れの発生のみを確認した。そこで、標準試験片(No.1)の傷部膨れ幅を標準として、試験結果のばらつきを考慮した上で、標準と比較し50%以上の傷部膨れ幅を認めた試験片を、検証因子の影響により防食性が低下した状態と判断した。

その結果、外観上の塗膜変状に関して、以下に示す2つの傾向を確認した。

1) 標準条件と比べ早期(試験期間1年)から傷部の膨れ幅が拡大する傾向を示した検証因子……(No.2、5、6、8、10)

2) 経年で徐々に傷部の膨れ幅が増大する傾向を示した検証因子……(No.9、10、11)

これら検証因子による防食性への影響を明らかにすることを目的として、3年経過後の防食性に対して特に影響の顕著であった試験片(No.1、2、6、9、10、11)に関して、以下に示す解析を行った。

表3 塗膜変状観察結果

検証因子	概 要	試験片 No.	試験期間											
			1年				2年				3年			
			一般部		傷施工部		一般部		傷施工部		一般部		傷施工部	
			さび	膨れ	さび幅	膨れ幅	さび	膨れ	さび幅	膨れ幅	さび	膨れ	さび幅	膨れ幅
—	標準条件	1	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	0.8mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.6mm
A. 端部処理	不十分	2	Ri 0 ¹⁾	無し	0.0mm	2.2mm	Ri 0 ¹⁾	無し	0.0mm	3.0mm	Ri 0 ¹⁾	無し	0.0mm	3.0mm
B. 基材素地 調整方法	粗さ変更	3	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.8mm
	研掃材変更	4	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.5mm
C. 基材 酸化状態	軽度の酸化	5	Ri 0	無し	0.0mm	1.2mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.6mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.2mm
	重度の酸化	6	Ri 0	無し	0.0mm	1.9mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.9mm	Ri 0	無し	0.0mm	3.0mm
D. 塗料希釈量	防食下地過希釈	7	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.2mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.0mm
	下塗過希釈	8	Ri 0	無し	0.0mm	1.3mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.8mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.8mm
E. 有機ジンクリッチ ペイント塗装方法	スプレーガスト	9	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	3.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	15.0mm
F. 塗膜養生期間	短期養生	10	Ri 0	無し	0.0mm	1.8mm	Ri 0	無し	0.0mm	3.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	4.0mm
	長期養生	11	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.2mm	Ri 0	無し	0.0mm	3.0mm
G. 傷施工方法	複数回施工	12	Ri 0	無し	0.0mm	0.0mm	Ri 0	無し	0.0mm	1.2mm	Ri 0	無し	0.0mm	2.8mm

1) 端部処理不十分箇所近傍のみ発錆を認めたが、評価対象外とした。

3.2 試験片の解析

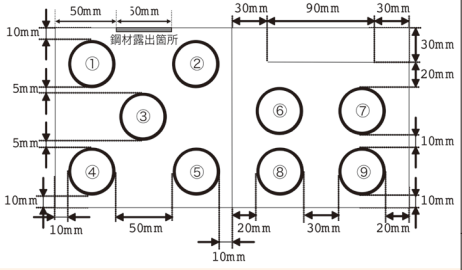
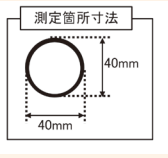
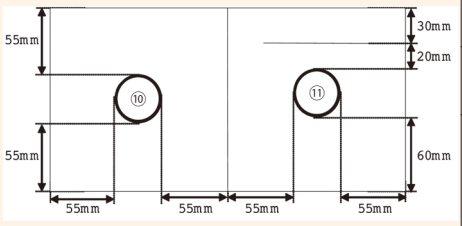
3.2.1 CI (Current Interrupter) 法による分極抵抗値測定

CI法による電気化学的測定は、塗装鋼板に微小電流(最小で1.46pA)を流し、電流を切断した際に生じる放電現象(電位減衰現象)を電気信号として捉え、これを解析することにより、塗膜下金属の劣化度および塗膜の劣化度を判定する²⁾。CI法による電気化学的測定では、分極抵抗値・分極容量値・塗膜抵抗値・塗膜容量値が算出されるが、本報では塗膜下鋼材表面の抵抗を示す分極抵抗値(測定限界：4~11[log(Ω/cm^2)])を考察対象とした。なお、過去の報告から、CI法で測定した分極抵抗値と塗膜下鋼材の防食性には相関関係が認められることが証明されている^{3)~5)}。

測定箇所に関しては、有機ジンクリッチペイント塗装面にて1点、未塗装面(弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗二層のみを塗装した面)にて1点の計2点を基本とし測定を実施した。なお、検証因子「A.端部処理」の試験片(No.2)のみ傷部以外の箇所(鋼材露出部)での発錆が認められたことから、塗膜下鋼材における腐食の分布状態を把握するために、標準条件の試験片(No.1)を比較とし、試験片全面における複数点の測定を実施した。

CI法による各試験片分極抵抗値の測定結果を表4に示す。分極抵抗値が高いほど鋼材表面は健全な状態を維持しており、抵抗値が低くなるにしたがって鋼材表面における腐食現象が進行していることを示す。標準条件の試験片(No.1)は、いずれの測定箇所においても

表4 分極抵抗値測定結果

測定方法	測定箇所	検証因子	概要	試験片No.	傷施工部膨れ幅	測定点	分極抵抗値 [log($\Omega \cdot \text{cm}^2$)]	
							測定値	平均値
多点測定		—	標準条件	1	2.6mm	①	6.6	6.7
						②	6.2	
						③	6.7	
						④	6.8	
						⑤	7.1	
						⑥	6.2	6.9
						⑦	6.7	
						⑧	7.1	
						⑨	7.4	
		A. 端部処理	不十分	2	3.0mm	①	4.0	5.3
						②	4.2	
						③	4.4	
						④	6.5	
						⑤	7.3	
						⑥	5.3	6.3
						⑦	5.7	
						⑧	7.1	
						⑨	7.0	
2点測定		C. 基材酸化状態	重度の酸化	6	3.0mm	⑩	4.9	5.0
						⑪	5.0	
		E. 有機ジンクリッチペイント塗装方法	スプレーダスト	9	15.0mm	⑩	4.5	4.6
						⑪	4.6	
		F. 塗膜養生期間	短期養生	10	4.0mm	⑩	6.0	6.1
			長期養生	11	3.0mm	⑩	6.5	
						⑪	6.8	6.7

分極抵抗値が $6.2 \sim 7.4 [\log(\Omega \cdot \text{cm}^2)]$ の値を示した。これと同様に塗装完了後傷施工までの期間を変化させた(No.10, 11)の試験片に関しても、膨れの発生時期と膨れ幅は異なる結果を示したものの、分極抵抗値は $6.1 \sim 6.7 [\log(\Omega \cdot \text{cm}^2)]$ と高い値を示し、塗膜下鋼材は健全な状態を維持していることがわかった。一方で、検証因子「A.端部処理」(No.2)、「C.基材酸化」(No.6)、「E.有機ジンクリッチ塗装方法」(No.9)の試験片に関しては、分極抵抗値の低下を確認した。特に、傷部における膨れ幅が最も顕著であった検証因子「E.有機ジンクリッチ塗装方法」の試験片(No.9)に関しては、分極抵抗の値が平均 $4.6 [\log(\Omega \cdot \text{cm}^2)]$ であり、塗膜下鋼材腐食の進行を示唆する結果を示した。

試験片全面における複数点の測定を実施した検証因子「A.端部処理」の試験片(No.2)に関しては、標準条件の試験片(No.1)と比較し、試験片端部の鋼材露出箇所近傍(測定点①、②、③)および傷部近傍(測定

点⑥、⑦)において分極抵抗値の著しい低下を確認した。本結果から、有機ジンクリッチペイント塗膜による犠牲防食作用が十分に機能しない塗膜弱点部、およびその周辺部においては、広範囲における早期の鋼材腐食の進行を確認した。

3.2.2 傷部断面の観察

(No.1, 2, 6, 9, 10, 11)の試験片に関して、傷部を起点に試験片を切断し、DMSによる断面の拡大観察(200倍)を実施した。観察結果を図4に示す。

(No.2, 6, 9)の断面観察結果から、鋼材表面に沿って横方向への赤さびの進行が認められ、CI法による分極抵抗値の測定結果と相関が認められた。これらの結果に関しては、鋼材露出部が複数存在することで有機ジンクリッチペイント塗膜の犠牲防食機能が低下した場合(No.2)や、塗装前に鋼材表面が酸化し防食電流が正常に流れない場合(No.6)、有機ジンクリッチペイントが正常に成膜せず、十分な犠牲防食作用が発現し

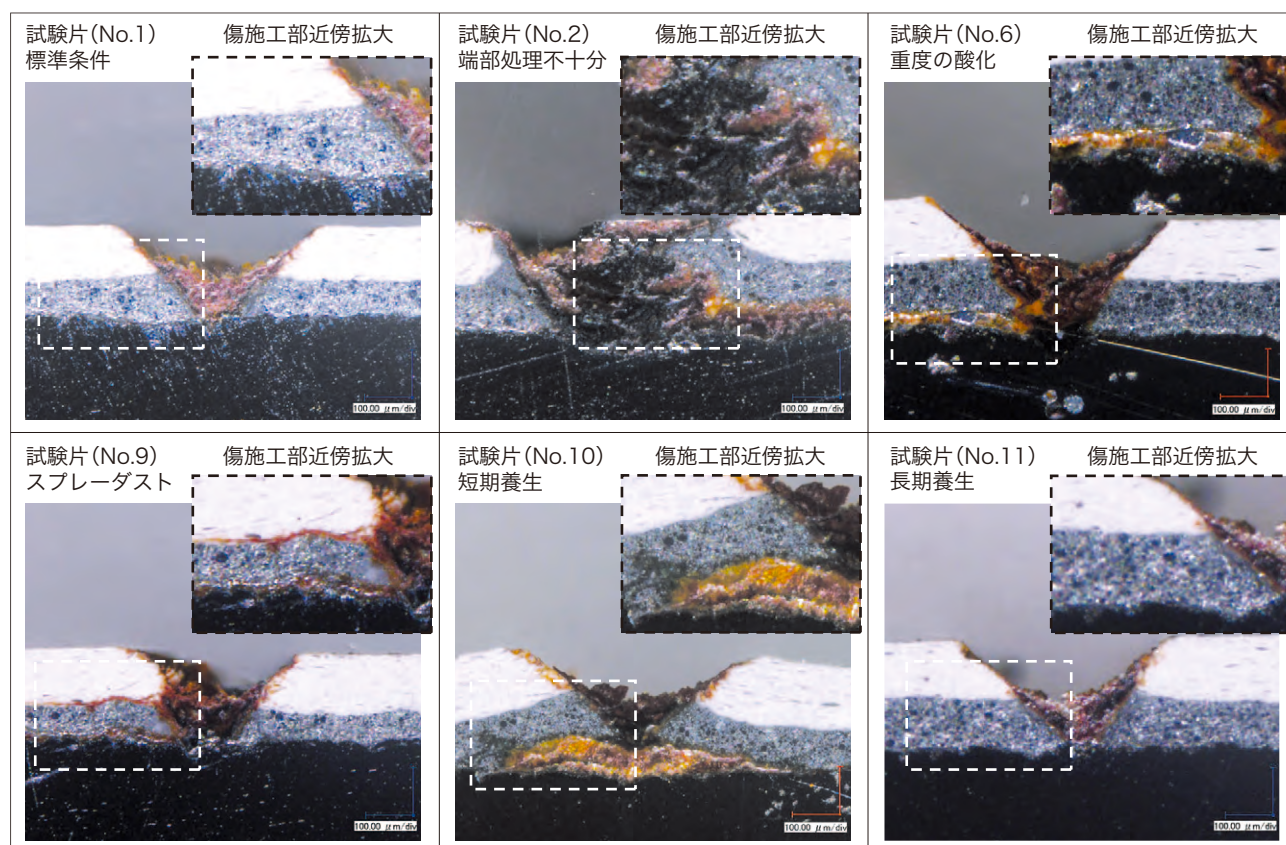


図4 傷施工部断面観察

ていない場合(No.9)など、いずれも有機ジंकリッチペイント塗膜の性能が十分発揮されないことに起因して、鋼材の腐食現象が助長されたためと推察する。

また、検証因子「F.塗膜養生期間」の試験片(No.10)においては、傷部から極めて狭い範囲に集中して赤さびが生じており、塗膜が押し上げられている状況を確認した。本現象は、前述の有機ジंकリッチペイント塗膜の機能発現が妨げられた現象とは異なると考える。本結果および分極抵抗値の測定結果から推測される腐食進行メカニズムを以下に示す。

1) 推測メカニズム1: 塗膜体積の収縮

塗膜は硬化反応の進行や内在する溶剤成分揮発により、体積が収縮していく。その際、塗膜中に蓄積された応力は弱点部である傷部に集中し、傷部近傍塗膜の付着力を低下させる。硬化乾燥の不十分な状態で傷を受けた塗膜に関しては、傷を受けた後に大きく体積収縮することから、傷部に対する応力集中が特に顕著となる。結果として、傷部は応力の集中により付着力が低下し、塗膜/基材間に微視的な空隙を生じたことで、鋼材表面

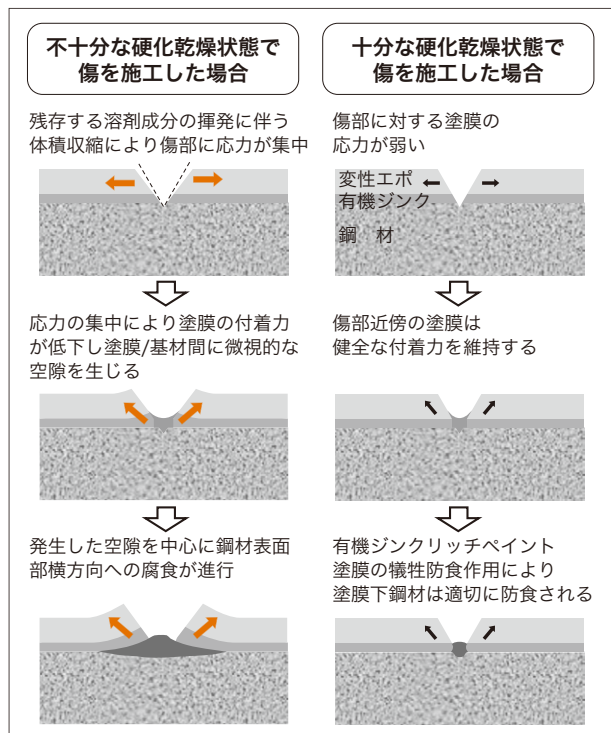


図5 硬化不十分な状態で傷を施工した塗膜の早期変状メカニズム

における腐食進行が促進されたものと推測する。硬化乾燥が十分に進行した後、塗膜は適切な付着力を発現することから、それ以上の膨れの進展は無くなったものとする。(図5)

2) 推測メカニズム2: 付着力の発現

塗膜は成膜過程で徐々に基材との付着力を発現する。本検証においては、基材に対して適切な付着力を発現する前の成膜途中の塗膜に対して傷を施工したため、傷施工時の物理的外力により近傍の塗膜が基材から引き剥がされ、塗膜/基材間に空隙を生じた状態で硬化したものと推察する。

本事象により、有機ジंकリッチペイント塗膜の犠牲防食作用が正常に機能せず、結果として傷近傍の早期膨れを生じたものとする。図6に塗装完了後早期に傷を施工し、硬化させた塗膜の傷部断面写真を示す。傷の施工により、傷部近傍の塗膜が基材と空隙を生じた状態で硬化している状況を確認できる。

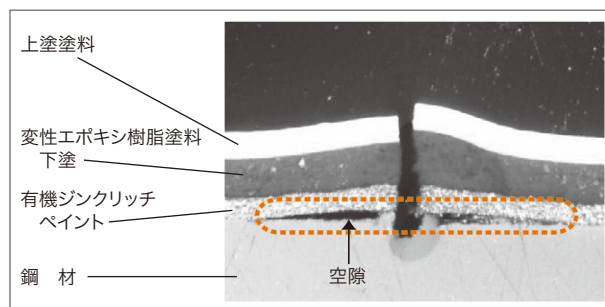


図6 硬化不十分な状態で傷を施工した塗膜の断面観察

4. まとめ

4.1 検証結果のまとめ

試験片作製時の施工エラーによる防食性への影響を検証した結果、以下の知見を得た。

- 1) 有機ジंकリッチペイント塗膜による犠牲防食作用が十分発揮されない部位に塗膜弱点部が存在する場合、その近傍の塗膜が外観上健全な状態を維持している場合においても、広範囲にわたる防食性の低下が認められ、塗膜下鋼材におけ

る腐食の進行を確認した。

- 2) 塗装前に鋼材表面が酸化している場合や、スプレードストの発生により有機ジンクリッチペイントが正常に成膜していない場合など、有機ジンクリッチペイントによる犠牲防食作用が正常に発現しない条件下においては、十分な防食性が得られず鋼材腐食の進行が促進された。
- 3) 硬化乾燥の不十分な塗膜に対して鋼材まで達する損傷を与えた場合、早期に鋼材の局部腐食が発生した。しかしながら、傷施工箇所を起点とする近傍塗膜の防食性の低下は認められなかった。

4.2 鋼構造物の維持管理上・施工上の留意点

上記知見に基づき、鋼構造物の維持管理上あるいは塗り替え塗装における施工上の留意点を以下に示す。

- 1) CI法による分極抵抗値の測定結果から、外観上健全な状態を維持している塗膜下においても、鋼材腐食が進行する場合があることを確認した。特に塗膜の損傷による局所的な腐食が存在する場合、その周辺部の塗膜下においては、広範囲にわたり早期の鋼材腐食を生ずる可能性があることから、これらの塗膜損傷に関しては、可能な限り迅速かつ適切な塗装仕様にて補修を行う必要がある。
- 2) 前記1)と同様の理由により、鋼材腐食が局所的に生じ易い弱点部(例えば添接部ボルト頭や漏水などの影響を受けやすい桁端部)については、あらかじめ耐久性に優れる塗装仕様を適用することや、塗装膜厚を厚く設定するなど、塗膜弱点部の発生を未然に防ぐための設計上の工夫が効果的である。
- 3) 本検証結果より、防食下地である有機ジンクリッチペイントの施工品質が、塗膜の耐久性に対して大きく影響を与えることがわかった。そのため、有機ジンクリッチペイント塗装時には、各塗料メーカー推奨の塗装条件にて、素地調整作業完了後、規定の時間内に塗装を実施することが肝要である。施工面積が広く、素地調整後規定間内での塗装実施が困難な場合、一定面積ごとに施工を分けて行う、あるいはリブラストにより防食下地塗装直前の素地調整仕上げを行うなどの工夫

が必要である。

5. 今後の予定

本報においては、素地調整程度1種を想定した施工上のエラー因子を中心に検証を実施した。今後は、本検証内容に加えて素地調整程度3種適用時における活膜部・不良部に対する種々検証因子(膜厚、膜厚勾配、旧塗膜影響、付着塩分量、除錆度、塗り替え塗装仕様など)による塗膜耐久性への影響を検証する予定としている。

6. おわりに

当社は重防食塗料を提供し、インフラストックの長寿命化における一側面を担っている。防食塗料は塗膜を形成することで初めて期待する防食性能を発現する材料であることから、塗膜の形成過程における早期劣化の要因を特定し、塗料本来の性能を発揮させることは重要であるが、一方で、施工上のエラーによる影響を受け難い適用幅の広い材料の開発も望まれている。優れた防食性を有する施工適用幅の広い材料開発を中心に、今後も継続して、インフラストックの長寿命化に貢献していきたいと考える。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所資料, 第488号
- 2) 田邊弘往: 表面技術, 45, 10, p.43(1994)
- 3) 永井昌憲, 山本基弘, 松本剛司, 多記徹, 田邊弘往: 色材協会誌, 77, 12, p548(2004)
- 4) 永井昌憲, 松本剛司, 多記徹, 宮下剛, 山本基弘, 里隆幸: 第24回防錆防食技術発表大会講演予稿集, p129(2004)
- 5) Masanori Nagai, Hiroyuki Tanabe, Tohru Taki, Masafumi Kano: Proceedings of Advances in Corrosion Protection by Organic Coatings 5(1997)