

10. 1 鋼橋防食工の補修に関する研究

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：材料地盤研究グループ（新材料）

研究担当者：西崎 到、守屋 進

【要旨】

近年、鋼道路橋の鋼材防食に適用されるようになってきた耐候性鋼材、溶融亜鉛めっき、金属溶射が適用されている橋梁の実態調査を行なった。その結果、耐候性鋼材が適用された橋梁で全ての部位で保護性さびを形成している橋梁はないなど、防食工によっては適用環境条件の見直しが必要なものがあることが明らかとなった。

耐候性鋼材の異常腐食や、溶融亜鉛めっき、金属溶射が異常劣化した場合、劣化程度による最適な補修方法（素地調整程度、素地調整方法、補修塗装系、金属溶射など）を明らかにするため、これら防食法を施し劣化させた試験片などを、その劣化程度に応じて素地調整程度と素地調整方法を組み合わせ、塗装および金属溶射で補修した試験片を作成して厳しい腐食環境の沖縄と山間部の朝霧で暴露試験を行った。暴露 2 年の調査の結果、耐候性鋼材の塗装による補修試験片は、素地調整程度が低いものについては、すでに補修塗膜にさび、膨れなどが生じ始めていた。

耐候性鋼材が異常腐食し塗装で補修する際に塗装の防食性能を十分に発揮させるための素地調整方法について検討を行った。その結果、耐候性鋼材のさびは普通鋼材のそれと比べて非常に固いため、ブラストでも十分な素地調整程度を得ることが難しいことが明らかとなった。

キーワード：実橋調査、鋼橋防食工、補修方法、素地調整程度、促進試験、暴露試験

1. はじめに

橋梁などの鋼構造物の耐久性を確保するためには、塗装などによる鋼材の防食が不可欠である。これまで鋼橋の大多数は塗装による防食が施されていたが、近年塗装以外の防食法として、耐候性鋼材、溶融亜鉛めっき、金属溶射が適用され始めてきた。しかしこれらの防食法は、鋼橋への適用実績がまだ十分でないため、その適用環境条件などが不明確であったり、異常劣化が発生した際の補修時期の判定法と補修方法が確立されていないのが現状である。このため、これら塗装以外の防食工の異常劣化の判定技術並びに補修方法の確立が求められている。

本研究では、以下の4項目の検討を行った。

- ①各種防食法の実態を把握するため橋梁調査
- ②屋外暴露試験による各種防食工の補修方法の検討
- ③異常腐食した耐候性鋼材を塗装で補修する際の素地調整方法についての検討
- ④新規塗料適用による塗装コスト削減の検討

なお、本研究は、塗料製造会社5社と防食会社1社と共同研究で実施した。

2. 各種防食工を適用した橋梁調査

2. 1 耐候性鋼材を適用した橋梁の調査

耐候性鋼材が使用された全国各地のさまざまな架設環境条件の 90 橋梁の目視外観調査を行った。調査した 90 橋梁を架設地域と環境で分類した結果を表 1 に示す。なお、架設環境の条件は、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（平成 14 年 3 月）図-解 5.1 耐候性鋼材を無塗装で使用する場合の適用地域で提案された飛来塩分量測定を省略して無塗装で使用してよい目安を用いた。表面処理種別の内訳は、無塗装（裸使用）：47 橋梁、耐候性鋼用表面処理剤：27 橋梁、塗装：16 橋梁であった。

2. 1. 1 調査方法

調査は目視観察による外観観察を中心に、セロファンテープ試験法によるさび外観評点および電導度法による付着塩分量の測定を一部の橋梁で実施した。セロファンテープ試験法によるさび外観評点は、鋼道路橋塗装・防食便覧（平成 17 年 12 月）の表Ⅲ. 6. 2(2)を準拠した。

2. 1. 2 調査結果

調査の結果、無塗装橋梁は、部位によって全く異なった状態で、すべて部位で良好な保護性さびを生成しているものはなかった。たとえば、日射を受け

る面と受けない面、水はけの悪い桁端部や下フランジ上面、湿気のこもり易い桁内面や下フランジ下面などはほとんどの橋梁で錆こぶや層状錆を生成していた。また、桁端部の漏水などによって湿気がこもり易い橋台上の部分に塗装された塗膜が無塗装部からの錆の侵入によって、はく離しているものがあった。日射の影響の例を写真－1 に、水はけの悪い部位の例を写真－2 に、良好な桁外面と湿気のこもり易い桁の内面で錆の状況が異なる例を写真－3 に示す。また、橋台上の桁端部を漏水などから保護するため行われている部分塗装の塗膜が、無塗装部分から剥がれ始めている例を写真－4 に示す。

表－1 調査した耐候性鋼橋梁の分類

地域		沖縄		九州		四国・中国		北陸		関東・甲信越		東北		北海道	
		日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側
表面状態															
調査橋梁数		12	9	20	27	3	13	2	2	2	2	2	2	2	2
海岸線からの直線距離	海上橋	無塗装(裸)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		表面処理	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		塗 装	2	—	3	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—
	～1 km	無塗装(裸)	—	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
		表面処理	1	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		塗 装	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1～2 km	無塗装(裸)	—	—	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	—
		表面処理	—	—	4	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		塗 装	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2～5 km	無塗装(裸)	—	3	—	2	—	4	—	—	—	—	—	—	—
		表面処理	—	—	1	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		塗 装	4	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
	5～20 km	無塗装(裸)	—	4	7	5	3	3	—	—	—	—	—	—	—
		表面処理	—	1	1	5	—	—	—	1	—	—	—	—	—
		塗 装	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	20km～	無塗装(裸)	—	—	2	2	—	4	1	—	1	—	—	—	—
		表面処理	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		塗 装	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—



a) 日射を受ける b) 日射を受けない
写真－1 日射の影響の有無



写真－2 水はけの悪い部位



a) 湿気のこもらない桁外面 b) 湿気のこもる桁内面
写真－3 湿気の影響の有無



写真－4 部分塗装の塗膜のはく離

2. 2 塗装で補修された耐候性鋼橋梁

2. 2. 1 調査概要

表面処理や初期から塗装された耐候性鋼橋梁（海岸部の3橋と山間部のダム湖に架かる1橋）が、異常腐食が進行したため塗装で全面補修された事例の塗装後の調査を行った。

2. 2. 2 調査結果

河口に架設されて21年目に、鋼道路橋塗装・防食便覧（以後、便覧という）のRc-I塗装系に準拠してブラスト処理後に有機ジンクリッチペイント/変性エポキシ樹脂塗料×2/ふっ素樹脂塗料中・上塗を塗装して4年経過したA橋梁では、狭隘部や部材端部など素地調整が十分できなかった部分を除いて塗膜は良好な状態であった。塗装で補修前の状況を写真－5に、塗装で補修4年後の塗膜の状況を写真－6に示す。

河口部に架設され、初期からジンクリッチプライマー/塩化ゴム系塗料下・中・上塗りの塗装系で塗装され23年経過時に素地調整程度1種と3種で素地調整し、鋼素地露出部にはジンクリッチプライマーを

塗付し、その他は便覧の Rc-Ⅲ塗装系に準拠して塗装されて3年経過したB橋梁では、塗膜はほぼ良好な状況であった。塗替え塗装前後の状況を写真-7に示す。

B橋梁とほぼ同様な状況の架設後25年経過時に素地調整程度3種でRc-Ⅲ塗装系で塗装されて3年経過したC橋梁では、素地調整が十分でない部分はボルト接合部などに発錆が多く見られた。塗替え塗装前後の状況を写真-8に示す。

山間部のダム湖に架設され30年経過後にブラスト処理しRc-I塗装系で補修された3年経過後のD橋梁は、良好な状況であった。塗装で補修3年後の状況を写真-9に示す。

以上の結果、十分な素地調整と、良好な防食性能を有する塗装系を適用することが必要であることを示す結果となった。



a) 塗替え塗装前 b) 塗替え塗装後3年
写真-8 塗替塗装前後 (C橋梁)
(素地調整程度3種)



a) 外桁外面 b) 下フランジ下面孔食跡
写真-9 塗装で補修後3年 (D橋梁)



a) 箱桁下面 b) 横桁
写真-5 素地調整前の異常腐食の状況 (A橋梁)



a) 桁内面 b) 横桁下面
写真-6 塗装で補修後4年の状況 (A橋梁)



a) 塗替え塗装前 b) 塗替え塗装後3年
写真-7 塗替塗装前後の状況 (B橋梁)
(素地調整程度1種)

2. 3 塗装で補修された溶融亜鉛めっき橋梁

溶融亜鉛めっきで防食されていた橋梁を塗装で全面補修した3橋の事例について調査を行った。対象とした橋梁はいずれも、北陸日本海沿岸に架設された溶融亜鉛めっきを防食法として適用した橋梁で、架設後10年、15年に溶融亜鉛めっきの消耗が著しく鋼材の一部に腐食が発生したため、ブラスト処理で劣化した溶融亜鉛めっきを除去し、有機ジンクリッチペイント (75 μ m) / 変性エポキシ樹脂塗料 (60 μ m $\times$ 2回) / ポリウレタン樹脂塗料中塗 (30 μ m)・上塗 (25 μ m) で補修塗装されたものである。調査は、補修後10年、6年、5年経過した時点で、それぞれの橋梁の塗膜の状態について行った。なお、一部腐食の著しい部位には、変性エポキシ樹脂塗料の2回目に厚膜型エポキシ樹脂塗料 300 μ m が適用されていた。

2. 3. 1 調査方法

調査項目は、塗膜外観、光沢度、膜厚、塗膜付着力 (プルオフ法と基盤目テープ法)、付着塩分量 (ガーゼ拭き取り塩素イオン検知管法) とした。

2. 3. 2 調査結果

架設後10年目に塗装で補修され10年経過していたE橋梁は、塗膜は全体的に良好な状態であったが、一部RC床版と鋼桁の境界及び接合部のボルトにさびが認められた。E橋梁の塗膜外観を写真-10に示す。光沢度は、海側外面で1.8、山側内面で29.6と非常に低下していた。膜厚は、570 μ m~910 μ mであ

った。プルオフ法による塗膜付着力は、いずれも1.5MPa以上、基盤目テープ法では、いずれも評価点1以下と良好であった。付着塩分量は、海側外面の下フランジ上面と腹板で60mg/m²程度、下フランジ下面で850 mg/m²程度、内面の下フランジ上面で2,000 mg/m²以上、腹板で390 mg/m²程度であった。

架設後15年目に塗装で補修され5年経過していたF橋梁は、塗膜は全体的に良好な状態であったが、接合部のボルト頭の一部にさびが認められた。F橋梁の塗膜外観を写真-11に示す。光沢度は、海側外面で30.2、山側内面で51.3であった。膜厚は、600 μm～1,250 μmであった。塗膜付着力の測定は行わなかった。付着塩分量は、海側外面の腹板で130mg/m²程度、下フランジ上面、下面共に2,000mg/m²以上、内面の下フランジ上面も2,000 mg/m²以上、腹板で500 mg/m²程度であった。架設後15年目の塗装で補修され6年経過していたG橋梁は、トラス橋で近接できないため、双眼鏡により塗膜外観観察のみを行った。その結果、塗膜は全体的には良好と見られるが、一部上塗り塗膜の消耗と思われる部分に下塗り塗膜が露出していた。G橋梁の塗膜外観を写真-12に示す。



a) 外桁外面
写真-10 塗装で補修後10年 (E橋梁)



写真-11 塗装で補修後5年 (F橋梁)



写真-12 塗装で補修後6年 (G橋梁)

2. 4 金属溶射を適用した橋梁

河口と海上に架設されているアルミニウム溶射に塗装を施し13年および2年経過した2橋を調査した。

2. 4. 1 調査方法

調査は、溶射皮膜あるいは、塗膜の外観を目視で調査した。

2. 4. 2 調査結果

H橋梁は、河口に架設された箱桁橋でアルミニウム溶射のエポキシ樹脂塗料下塗/ふっ素樹脂塗料中・上塗されて13年が経過していた。全体的に塗膜は良好な状態であったが、桁端部の打痕傷部や現場溶接部周囲及びステンレスボルト周辺の異種金属接触腐食によるとと思われる部分に塗膜の剥離と溶射皮膜に鋼材の錆が混ざった白錆が生じていた。H橋梁の外観を写真-13に示す。

I橋梁は、海上に架設された箱桁橋でアルミニウム溶射のエポキシ樹脂塗料下塗/ふっ素樹脂塗料中・上塗されて2年が経過していた。全体的に塗膜は良好な状態であったが、桁端部の打痕傷部や接合部のボルト部分の鋼材に錆が生じていた。I橋梁の外観を写真-14に示す。



a) 打痕傷部



b) 溶接部周囲
c) ステンレスボルト周辺
写真-13 金属溶射(AL) + 塗装後13年 (H橋梁)



a) 部材端部打痕傷



b) ボルト部

写真-14 金属溶射 (AL) + 塗装後2年 (I橋梁)

2. 5 金属溶射で補修された橋梁

都市内の河口近くに架設された塗装橋梁（塗装系は不明）の J 橋梁は、27 年後に金属溶射（亜鉛-アルミニウム擬合金溶射で補修され 10 年が経過していた。

2. 5. 1 調査方法

調査は、溶射皮膜の外観を主とし、一部浮いて剥がれていた皮膜を採取して光学顕微鏡で観察を行った。

2. 5. 2 調査結果

腹板は全体的に良好な状態であったが、局部的に施工の不具合に起因すると思われる溶射皮膜の浮きが見られた。桁端部、下フランジ上面及び下面、補強部材の水平面にも溶射皮膜の浮きや剥がれが見られた。コンクリート床版との境界部では、床版からの漏水の影響と思われる溶射金属の溶出による白錆や鋼材の腐食による赤錆が見られた。支承部や橋台上など構造上施工が困難な狭隘部に溶射皮膜の浮き、剥がれ、錆が見られた。施工時の足場撤去時に生じたと思われる溶射皮膜損傷部が散見された。剥がれていた被膜を工学顕微鏡で観察した結果、鋼材と粗面形成材の間で剥がれていることが明らかとなった。J 橋梁の剥がれていた皮膜の光学顕微鏡写真を写真-15 に、溶射皮膜の外観状況を写真-16 に示す。



写真-15 溶射皮膜断面（茶色は粗面形成材）



a 溶射皮膜の浮き

b 漏水部の腐食



c) 狭隘部の施工不良による腐食



d) 狭隘部の施工不良

e) 桁端部の打痕傷

写真-16 金属溶射で補修後 10 年（J 橋梁）

2. 6 各種防食工を適用した橋梁調査のまとめ

各種防食工が適用された 100 橋梁を調査した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 耐候性鋼橋梁 90 橋の調査結果より、42 橋は、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編で示されている耐候性鋼の適用環境条件（飛来塩分が 0.05mdd を超えない地域、または、日本海沿岸で海岸線から 20km（北陸以北）、5km（北陸以南）を超える地域、太平洋沿岸で海岸線から 2km、瀬戸内海沿岸で海岸線から 1km を超える地域）の適用地域内であった。14 橋は海岸線から 20km 以上離れた地域であったが、いずれの橋梁も全ての部位で保護性錆が生成しているものはなかった。すなわち、降雨を受けない部位、湿気のこもりやすい部位、飛来塩分が貯まりやすい部位、凍結防止剤を含む漏水を受ける部位などでは、瘤状錆や層状錆になっているものがほとんどであった。このことから、耐候性鋼材の適用環境条件を見直す必要があることが明らかとなった。

(2) 異常腐食した耐候性鋼橋梁を塗装で補修された橋梁の調査結果より、補修に際しては、錆をブラストで確実に除去して便覧の Rc-I 塗装系を適用したものに効果が認められた。このとき、狭隘部は素地調整、塗装ともに施工ににくいので十分に留意する必要がある。

(3) 塗装で補修された溶融亜鉛めっき橋梁の調査の結果、全体的には良好に防食されているが、素地調整が十分できない狭隘部や膜厚が確保されにくいボルト頭などに錆が発生していることが明らかとなった。便覧では、溶融亜鉛めっきは、飛来塩分量が多い地域や凍結防止剤の影響を受ける部材などには

適用限界があるとしているので、適用環境条件の見直しは必要ないことが明らかとなった。

(4) 金属溶射が適用された橋梁の調査結果より、厳しい沿岸部では、溶射皮膜に重防食塗装を併用することが適当であることが明らかとなった。

(5) 金属溶射で補修された橋梁の調査結果より、現場での金属溶射は、狭隘部で良好な素地調整及び溶射施工ができないので金属溶射での補修は十分留意する必要があることが明らかとなった。また、擬合金溶射において素地調整作業を軽減するために用いられている粗面形成剤の上で、皮膜に浮き、剥がれが生じている例が多数見られた。これは粗面形成剤が金属皮膜を透過した水分を遮断することが原因と考えられる。

以上のことから、金属溶射の適用環境条件は、一般環境や凍結防止剤の影響を受けない場所で適用することとなっており、適用環境条件の見直しは必要ないが、水吐きの悪い箇所や打痕傷を受けやすいところでは十分な防食性能を発揮しにくいことが明らかとなった。

3. 各種防食工の補修方法の検討

3. 1 試験片の製作

耐候性鋼、溶融亜鉛めっき、金属溶射を施した試験片を海浜部の千倉と田園部のつくばで暴露期間を変えて暴露し、劣化程度の異なる3水準の劣化試験片とした。一部は、すでに10年以上実橋の内桁に暴露されていた試験片を用いたり、沖縄暴露場の暴露架台のめっき部材を切り出したものを劣化試験片とした。これら劣化程度の異なる試験片に素地調整程度として、Sa2 1/2, Sa2, Sa1, St3, St2, St1 程度の6段階の処理を行った。素地調整方法は、Saはブラスト(研削材:アルミナ)、Stは、電動工具を砥石ディスクサンダー、ダイヤモンドツール、超合金サンダー、ペーパーサンダーを用いた。また、素地調整前に付着塩分を除去するための水洗の有無などを組み合わせた。素地調整を行った試験片に補修塗装を施した。補修塗装系は、素地調整程度に併せて鋼道路橋塗装・防食便覧(以下、便覧と記す)の Rc-I, Rc-

III, Rc-IVとした。補修金属溶射は、亜鉛・アルミニウム合金溶射(JIS 溶射)と亜鉛・アルミニウム擬合金溶射(常温溶射)とした。常温溶射では、粗面形成剤の有無を組み入れた。また、金属溶射の封孔処理剤も3種類用いた。

3. 2 耐候性鋼材の補修試験

3. 2. 1 研究の方法

前節3. 1に記述した方法で処理をしたJIS 耐候性鋼材を海浜部の千葉県千倉で2ヶ月, 5ヶ月, 10ヶ月間暴露と田園部の茨城県つくばで10箇月間暴露して腐食させ、異なるさびレベルの劣化試験片とした。また、比較として全く暴露していない試験片と普通鋼材を千倉とつくばで10ヶ月暴露したものも作成した。回収した劣化試験片は、水洗の有無、素地調整程度と方法、塗装系を表-2に示すように設定して補修試験片(200mm×300mm×6mm)を製作した。素地調整程度は、耐候性鋼材のさびは普通鋼材に比べて硬いため、ブラスト処理は研削材にアルミナを使用した。処理程度は、理想的なSa2 1/2、Sa2 1/2を目指しても実際には困難なため実務的なSa2、一部はSa1とした。電動工具処理では、砥石ディスクサンダーを主とし、一部にダイヤモンドツールと超合金サンダーを使用した。補修方法は、塗装または金属溶射とした。塗装による補修は、便覧に準拠して素地調整程度に応じた塗装系を適用した。一部に便覧の塗装系よりも防食性を向上させるため膜厚を大きくした塗装系を追加した。金属溶射による補修は、素地調整程度Sa2とSt3で粗面形成材を塗付して常温溶射を、Sa2でJIS溶射を行った。いずれも封孔処理を行いふっ素樹脂塗料中・上塗りを塗装した。作成した補修試験片は、つくばで10ヶ月間暴露してさびさせた耐候性鋼と普通鋼については朝霧(山間部)で、それ以外はすべて沖縄(亜熱帯海浜部)で暴露試験に供した。暴露2年目にこれら試験片の外観調査を実施した。

表－2 耐候性鋼材の補修試験一覧

試験主旨	No.	暴露場所	鋼材	暴露期間 及びレベル	水洗の有無	素地調整 程度	素地調整 方法	便覧系 塗装系	塗装系と膜厚														合計膜厚 μm
									有機シソ	改良シソ	無機シソ	JIS溶射ZnAl	粗面形成材	常温溶射	封孔処理材	変性Eポ	付着Eポキシ	超厚膜Eポ	Eポキシフレック	ふっ素中塗	ふっ素上塗		
<基本> 便覧の塗 装系での 暴露期間 と ケレン程度 の影響把握	1	千倉 沖縄	耐候性鋼	10ヶ月 (Ⅲレベル)	なし	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	2					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	3							Rc-Ⅳ								60				30	25	115	
	4				あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	5							Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	6					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	7			5ヶ月 (Ⅱレベル)	なし			Rc-Ⅳ								60				30	25	115	
	8					Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	9					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	10				あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	11							Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	12					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	13			2ヶ月 (Ⅰレベル)	なし			Rc-Ⅳ								60				30	25	115	
	14					Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	15					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	16				あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	17							Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	18					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
19	10ヶ月 (Ⅲレベル)			あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ			75							60				30	25	115
20							Rc-Ⅰ								120				30	25	250		
21					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅰ								120				30	25	250		
22					Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75								300				30	25	430	
23							Rc-Ⅰ	75									300			30	25	430	
24					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅰ										300		300	30	25	355	
25							Rc-Ⅰ											300			30	25	355
26							Rc-Ⅰ	40									300			30	25	395	
27							Rc-Ⅰ	40										300		300	30	25	395
28							Rc-Ⅰ									40	300			30	25	395	
29							Rc-Ⅰ									40		300		30	25	395	
30					Sa2	アルミナ	JIS溶射					100			有エポ系					30	25	155	
31							常温溶射								有エポ系					30	25	155	
32					St3	珪石デイスサンダー	常温溶射						あり	100	有エポ系					30	25	155	
No4, 6の 普通鋼	33	普通鋼	10ヶ月 (Ⅲレベル)	あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75								120				30	25	250	
34	St3				珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ									180				30	25	235		
No1～30 の つば暴露	35	つば 朝露	耐候性鋼	10ヶ月 (Ⅲレベル)	あり	Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
	36					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	37			普通鋼	あり			Rc-Ⅳ								60				30	25	115	
	38					Sa2	アルミナ	Rc-Ⅰ	75							120				30	25	250	
39	St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ									180				30	25	235					
No1～30 の 暴露なし 比較の為	40	暴露なし 沖縄	耐候性鋼	0ヶ月	なし	Sa2	アルミナ	C-5			75					120				30	25	250	
	41							Rc-Ⅰ	75						120				30	25	250		
	42					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
	43							Rc-Ⅳ								60				30	25	115	
No6, 12の 刷毛塗り	44	千倉 沖縄	普通鋼	10ヶ月 5ヶ月	あり	St3				75						180				30	25	235	
	45					St3	珪石デイスサンダー	Rc-Ⅲ								180				30	25	235	
No4の ブラスト程度	46	千倉 沖縄	耐候性鋼	10ヶ月 (Ⅲレベル)	あり	Sa2, 5				75						120				30	25	250	
	47					Sa1	アルミナ	Rc-Ⅰ		75						120				30	25	250	
No6の ケレン程度	48	千倉 沖縄	普通鋼	10ヶ月 (Ⅲレベル)	あり		ダイヤモンド									180				30	25	235	
	49						超合金サンダー	Rc-Ⅲ							180				30	25	235		
	50						ペーパーサンダー									180				30	25	235	

3. 2. 2 研究の結果

暴露2年の補修試験片の外観調査結果を表－3に、外観写真を写真－17に示す。その結果は以下のとおりである。

- ① 錆レベルⅢ（補修前の劣化試験片の錆レベルを示す。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとレベルが大きくなるに従って、錆が著しくなる。以下、同様）では、素地調整程度 Sa2の方が、St3より防食性に優れている。
- ② 錆レベルⅢでは、Sa2では水洗の有無に有意な差はないが、St3では、水洗に有意な差が見られた。
- ③ 錆レベルⅠでは、塗装系の防食性は Rc-Ⅰ＞Rc-Ⅲ＞Rc-Ⅳの順であった、
- ④ 錆レベルⅢでは、素地調整程度 St3において塗膜

厚を増やしても効果はほとんど見られない。

- ⑤ 錆レベルⅢでは、金属溶射は素地調整程度 St3では防食性がない。
- ⑥ 錆レベルⅢでは、素地調整方法は、ブラストの方が、電動工具処理より防食性が優れている。
- ⑦ 錆レベルⅢの普通鋼も素地調整程度 Sa2の方が、St3より防食性に優れている。
- ⑧ 錆させていない試験片に素地調整程度 Sa2と St3で塗装して厳しい腐食環境の沖縄に暴露すると Sa2の方が St3より防食性に優れている。
- ⑨ 錆レベルⅢを電動工具処理する際、ダイヤモンドツール、超合金サンダー、ペーパーサンダーで防食性に大きな差異はない。

表-3 耐候性鋼材の補修塗装試験片の暴露2年目の調査結果

試験主旨	試験板No.	カット入り試験板										カットなし試験片	
		表面					裏面					表面	裏面
		さび 評価 点	膨れ 評価 点	膨れ幅 最大mm	膨れ幅 平均mm	膨れ幅 最小mm	さび	膨れ	膨れ幅 最大mm	膨れ幅 平均mm	膨れ幅 最小mm	付着力 (MPa)	付着力 (MPa)
<基本> 便覧の塗装 系の暴露期 間と素地調 整程度の間 係の把握	1	0	0	1	0	0	0	0	3	2	1	>7	>7
	2	I	II	35	20	5	I	II	全面膨れ			6	7
	3	III	II	全面膨れ			II	II	全面膨れ			3	7
	4	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1	5	5.5
	5	I	II	15	5	0	I	II	13	4	2	4	5
	6	I	II	全面膨れ			I	II	全面膨れ			4.5	4.5
	7	III	II	全面膨れ			III	II	全面膨れ			3	2.5
	8	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1	>7	>7
	9	I	II	10	5	2	0	II	12	7	5	7	6.5
	10	0	0	1	1	1	0	0	5	2	1	>7	>7
	11	0	0	14	8	2	0	0	4	3	2	>7	7
	12	0	I	11	8	5	0	I	8	6	4	4	3
	13	I	I	9	5	2	I	I	7	5	3	5	3
	14	0	0	1	0	0	0	0	3	2	1	>7	>7
	15	0	I	7	3	2	0	I	10	8	3	4.5	5.5
	16	0	0	2	1	0	0	0	3	2	2	>7	>7
	17	0	0	2	1	1	0	0	6	4	3	6	>7
	18	0	I	20	4	2	0	I	18	10	3	>7	>7
	19	0	I	10	5	3	0	0	12	8	4	>7	>7
No1~19の 耐久性を向 上させた塗 装系	20	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	6.5	>7
	21	I	I	35	15	5	I	II	25	15	7	>7	>7
	22	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	6	5.5
	23	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	7	4.5
	24	0	III	全面膨れ			0	II	全面膨れ			3.5	4.5
	25	0	I	7	5	2	0	I	13	7	2	3	6.5
	26	0	II	10	5	1	0	II	10	4	1	5	3.5
	27	0	0	1	1	0	0	0	8	6	2	3	3
	28	0	I	33	25	10	0	II	40	25	10	5	4.5
溶射での補 修方法	29	0	0	25	10	5	0	0	27	15	5	4	7
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6.5
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	>7
No4, 6の普 通鋼	32	0	I	20	10	1	0	II	20	10	2	1.5	5
	33	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	4.5	5
No1~30の つくば⇒朝 霧暴露	34	I	II	全面膨れ			I	II	全面膨れ			5	>7
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.5	7
	36	0	I	0	0	0	0	I	0	0	0	5	3
	37	0	I	0	0	0	0	I	0	0	0	3.5	4
	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5	4
No1~30の 暴露なし⇒ 沖縄暴露 (比較)	39	0	I	0	0	0	0	I	0	0	0	4.5	3.5
	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4.5
	41	0	0	1	1	0	0	0	2	1	0	>7	7
	42	0	0	23	12	3	0	0	31	15	7	>7	>7
No6, 12の 刷毛塗り	43	0	0	45	12	4	0	0	33	10	4	>7	4
	44	I	III	全面膨れ			I	III	全面膨れ			3.5	6
No4のプラ ス ト程度	45	0	I	12	10	4	0	II	13	10	5	>7	5
	46	0	0	1	1	1	0	0	2	1	1	7	>7
No6の素地 調整程度	47	I	I	7	2	1	I	I	5	3	1	>7	>7
	48	I	II	20	10	3	I	III	12	8	5	6.5	>7
	49	I	II	20	10	0	I	III	全面膨れ			3	>7
	50	I	III	全面膨れ			I	III	全面膨れ			1.5	2

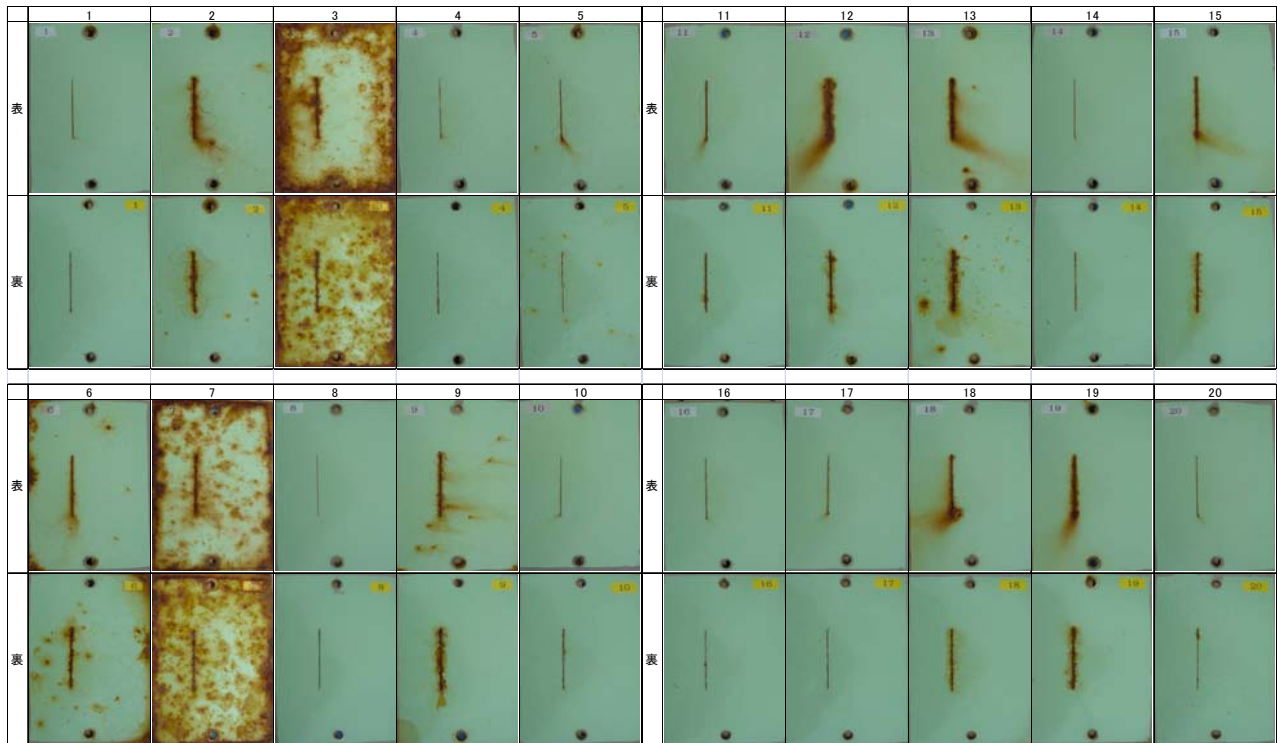


写真-17 (1) 耐候性鋼材の補修塗装試験片の暴露 2 年の外観

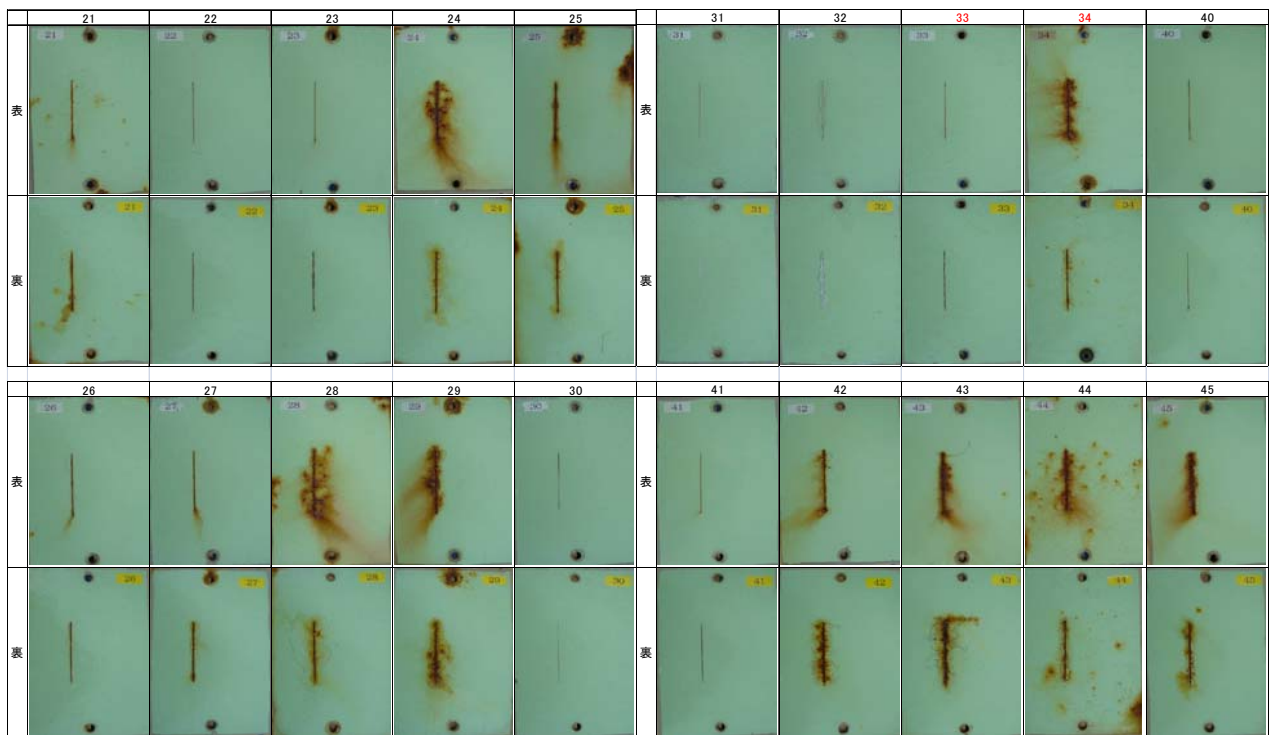


写真-17 (2) 耐候性鋼材の補修塗装試験片の暴露 2 年の外観

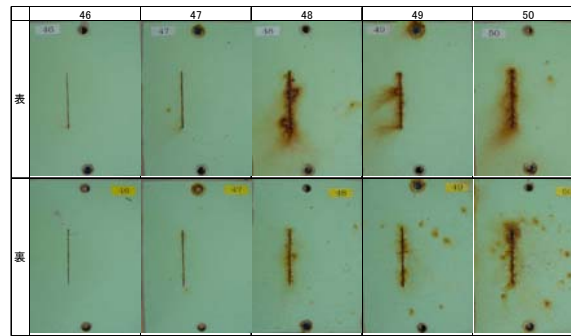


写真-17 (3) 耐候性鋼材の補修塗装試験片の暴露2年の外観

3. 3 溶融亜鉛めっき鋼材の補修試験

3. 3. 1 研究の方法

溶融亜鉛めっきの補修試験一覧表を表-4 に示す。以下の4種類の腐食程度の異なる溶融亜鉛めっき鋼板を準備した。①溶融亜鉛めっき鋼板の一部をディスクサンダーでめっきを除去して沖縄暴露場に暴露して部分的に赤さびが生じている試験片(200mm×300mm×3.2mm)、②北陸道の溶融亜鉛めっき橋に暴露されていた全面白さびの生じている試験片(100mm×200mm×3.2mm)、③沖縄暴露場の暴露架台から切り出した溶融亜鉛めっきされたアングル材(幅 50mm、

厚さ4mm、長さ300mm)、④工場地帯の鶴見に暴露されていた溶融亜鉛めっき板(100mm×200mm×3.2mm)。素地調整程度は、赤さび部はSa2 1/2 または St3 に、白さび部はSa1 または St3 とした。補修方法は、塗装あるいは金属溶射で行った。素地調整後の塗装による補修は、便覧の Rc-I を主として塗装し、さらに下塗りを厚くした塗装系も適用した。金属溶射による補修は、JIS 溶射と粗面形成材を塗付して常温溶射を行い、封孔処理して塗装した。これらは、沖縄（一部は朝霧）で暴露試験を行った。

表-4 溶融亜鉛めっきの補修試験一覧

試験主旨	劣化メッキ板			No.	メッキの劣化部	素地調整程度	塗装系と膜厚												補修後の暴露場所	
	暴露場所	種類	形状				JIS溶射 ZnAl	粗面形成材	常温溶射	封孔処理	有機シロク	メッキ用メッキ	超厚膜エポキシ	変性エポキシ	ふっ素中塗	ふっ素上塗	合計膜厚	沖縄	朝霧	
部分補修を意図した試験	土研 沖縄	Zn	20*30cm 平板 半分が赤錆 メッキ部の劣化度中	M1	赤さび部	Sa2. 5						75			120	30	25	250	*	
					白さび部	Sa1							120	30	25	250				
				M2	赤さび部	St3					75			120	30	25	250	*		
					白さび部	St3					75			120	30	25	250			
全面劣化した場合の基本的な補修策	北陸道 五郎太谷川	Zn	10*20cm 平板 メッキ部の劣化度大を使用 垂直板	M3	赤さび部	Sa2. 5	100			有クレヤー-A								100	*	
					白さび部	Sa1														
				M4	赤さび部	Sa2. 5		あり	100	有クレヤー-B								100	*	
					白さび部	Sa1														
				M5		Sa2. 5					75				120	30	25	250	*	
				M6							75				120	30	25	250	*	
				M7							75				120	30	25	250		*
				M8		Sa1					75		300			30	25	430	*	
				M9							75		300			30	25	430	*	*
				M10								40		300		30	25	395	*	
				M11							75			300		30	25	430	*	
				M12		St3					75			300		30	25	430	*	*
				M13								40		300		30	25	395	*	
				M14		Sa2. 5	100			有クレヤー-A								100	*	
				M15				あり	100	有クレヤー-B								100	*	
M16		Sa1	100			有エポ系				120	30	25	275	*						
M17				あり	100	有エポ系				120	30	25	275	*						
M18		St3		あり	100	有エポ系				120	30	25	275	*						
ケレン、塗装がし難い箇所の試験	土研 沖縄	Zn	アングル 劣化度大の内外面を使用	M19	谷:劣化大	Sa2. 5				75			120	30	25	250	*			
					山:劣化中	Sa1				75			120	30	25	250				
				M20	谷:劣化大	St3				75			120	30	25	250	*			
					山:劣化中	St2				75			120	30	25	250				
				M21	谷:劣化大	St3				75		300		30	25	430	*			
					山:劣化中	St2				75		300		30	25	430				
工業地域における	鶴見	Zn	アングル 劣化度小	M22	谷:劣化大	St3					40		300		30	25	395	*		
					山:劣化中	St2					40		300		30	25	395			
				M23	谷:劣化中	St3				75				120	30	25	250	*		
					山:劣化小	St2				75				120	30	25	250			
				M24	表:赤さび	St3				75				120	30	25	250	*		
					裏:劣化小	St3				75				120	30	25	250			

3. 3. 2 研究の結果

暴露2年の補修塗装試験片の外観を調査した結果を表-5に、外観写真を写真-18に示す。溶融亜鉛めっきが全面劣化した場合と部分劣化した場合の

暴露試験2年目では、北陸道の溶融亜鉛めっき橋に暴露されていた全面白さびの試験片をSt3で処理して粗面形成材を塗付し亜鉛-アルミニウム擬合金溶射をし、封孔処理後に変性エポキシ樹脂塗料 120μ

m/ふっ素樹脂塗料中塗 30 μ m/ふっ素樹脂塗料上塗 25 μ m を塗装した試験片のみふくれを生じていた。また、この試験片は、カット部からのふくれ幅も最

大 15mm と突出していた。その他の試験片は、ほとんどがさび、膨れがなく、塗膜外観と付着力に異常はなかった。

表-5 溶融亜鉛めっきの補修塗装試験片の暴露2年目の調査結果

試験主旨	試験板No.	カット入り試験板										カット無試験板	
		表面(山)					裏面(谷)					表面	裏面
		さび	膨れ	膨れ幅 最大mm	膨れ幅 平均mm	膨れ幅 最小mm	さび	膨れ	膨れ幅 最大mm	膨れ幅 平均mm	膨れ幅 最小mm	付着力 (MPa)	付着力 (MPa)
部分補修を意図した試験	M1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	4	4
	M2	0	0	2	1	0	0	0	6	3	2	1.5	2
	M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	3
	M4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3.5
全面劣化した場合の基本的な補修策	M5	0	0	2	1	1	0	0	2	1	1	3	4
	M6	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	2.5	2
	M7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5	3
	M8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
	M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2.5
	M10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1.5	4.5
	M11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3
	M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4
	M13	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	2	3
	M14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3
	M15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	3.5
	M16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	M17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
	M18	0	I	15	4	2	0	0	0	0	0	1.5	4
素地調整及び塗装 難しい箇所の補修試験	M19	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	—	—
	M20	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	—	—
	M21	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	—	—
	M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
	M23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—
工業地域の劣化 めっきの補修試験	M24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	—

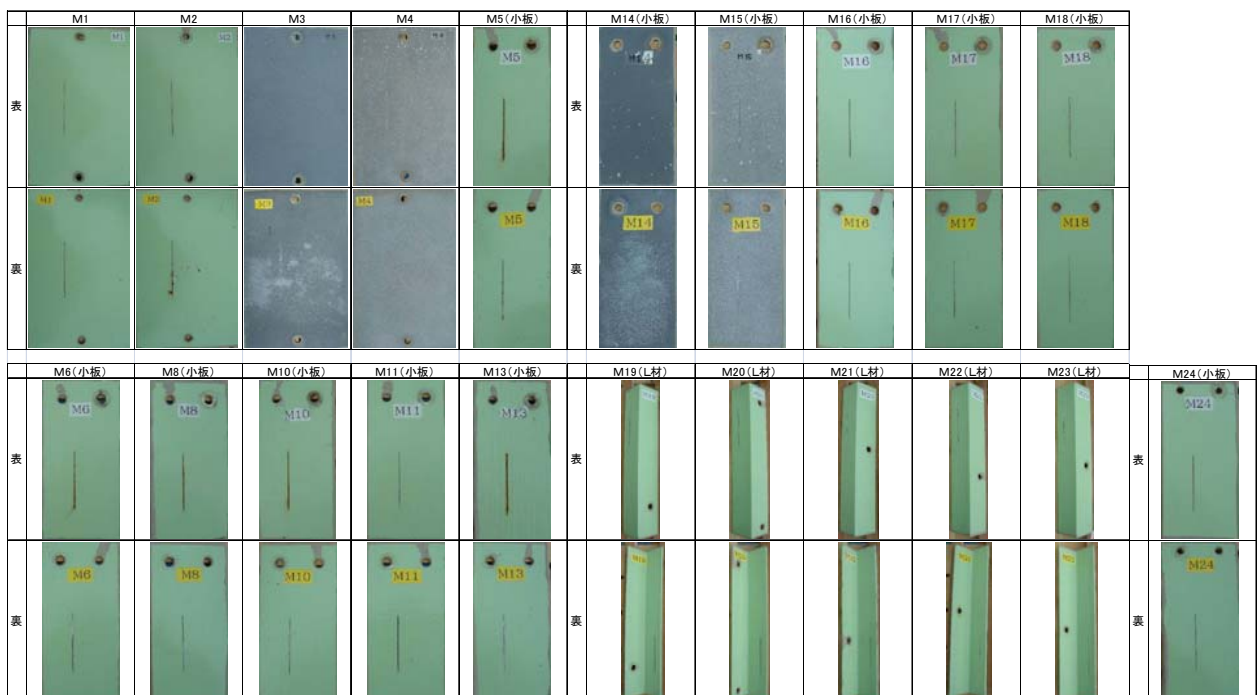


写真-18 溶融亜鉛めっき補修塗装試験片の暴露2年の外観

3. 4 金属溶射の補修試験

3. 4. 1 研究の方法

金属溶射の補修試験一覧表を表-6 に示す。アルミニウム溶射、亜鉛-アルミニウム溶射、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射を施した試験片(200mm×300mm×6mm)を千倉で10ヶ月暴露して劣化させた試験片を全面補修するものと部分補修するものに分け、全面補修するものについては、Sa2.5 から Sa1 程度に素地調整した試験片にアルミニウムと亜鉛-アルミニウムの JIS 溶射と粗面形成材を塗付して亜鉛-アルミニウム擬合金溶射をし、封孔処理を施し塗装し補修試験片とした。部分補修するものについては、赤さび部は Sa2 1/2、白さび部は Sa1 に素地調整し、St1 は、白さび部をワイヤーホイルで目粗し程度に処理し、便覧のめっき面用塗装系に準拠した塗装を

施し補修試験片とした。これら補修試験片はすべて沖縄で暴露試験に供した。

3. 4. 2 研究の結果

暴露2年の補修塗装試験片の外観調査した結果を表-7 に、外観写真を写真-19 に示す。金属溶射が全面劣化した場合と部分劣化した場合のいずれも暴露試験2年目では、一部の試験板にさび、または膨れがみられたが、ほとんどの試験板は良好な塗膜外観であった。アルミニウム溶射試験片の白さび部を St1 でめっき面用エポキシ樹脂塗料 40 μ m/ふっ素樹脂塗料中塗 30 μ m/ふっ素樹脂塗料上塗 25 μ m で補修した試験片のみカットからの膨れ幅が大きかった。それ以外の補修法(素地調整程度、塗装系)に有意な劣化は認められなかった。

表-6 金属溶射の補修試験一覧表

試験主旨	劣化溶射板		No.	溶射の劣化部	塗装系と膜厚													補修後の暴露場所	
	劣化度	溶射種類			素地調整程度	粗面形成材	JIS溶射	常温溶射	封孔処理	有機シソ	超厚膜E本	めっき用E本	変性E本	ふっ素中塗	ふっ素上塗	塗合計膜厚	沖縄	朝霧	
全面劣化した場合の補修策として溶射＋塗装	大 各4枚あり	B アルミ100μ＜	Y1	Sa2. 5 ～ Sa1	なし	Al100μ			有メー-A							100	*		
			Y2						有エボ系				120	30	25	315	*		
		D 亜鉛7%100μ＜	Y3						有メー-A							100	*		
			Y4		なし	ZnAl100μ			有エボ系				120	30	25	315	*		
		F 擬合金130μ＜	Y5						有メー-B						100	*			
			Y6						擬合金100μ		有エボ系				120	30	25	315	*
比較のため	小 各4枚あり	A アルミ100μ＜	Y7	Sa2. 5					75			120	30	25	250	*			
		Y8	赤さび部	Sa2. 5					(75)	(300)				30	25	470	*		
			白さび部	St1											95				
部分劣化した場合の補修策としての部分補修塗装		C 亜鉛7%100μ＜	Y9	赤さび部	Sa2. 5					(75)	(300)			30	25	470	*		
				白さび部	St1											95			
		E 擬合金130μ＜	Y10	赤さび部	Sa2. 5					(75)	(300)			30	25	470			
			白さび部	St1											95				

表-7 金属溶射の補修試験片の暴露2年目の調査結果

試験主旨	試験板No.	カット入り試験板					カット無試験板
		表面(山)					表面
		さび	膨れ	膨れ幅 最大mm	膨れ幅 平均mm	膨れ幅 最小mm	付着力 (MPa)
全面劣化の補修 (溶射+塗装)	Y1	0	0	0	0	0	4
	Y2	0	0	3	2	1	3
	Y3	0	0	0	0	0	6.5
	Y4	0	0	0	0	0	5.5
	Y5	0	0	0	0	0	3
	Y6	0	0	0	0	0	6
比較	Y7	0	0	0	0	0	>7
部分劣化の補修 (部分補修塗装)	Y8	0	0	20	3	1	3.5
	Y9	0	0	5	1	1	3.5
	Y10	0	0	0	0	0	4

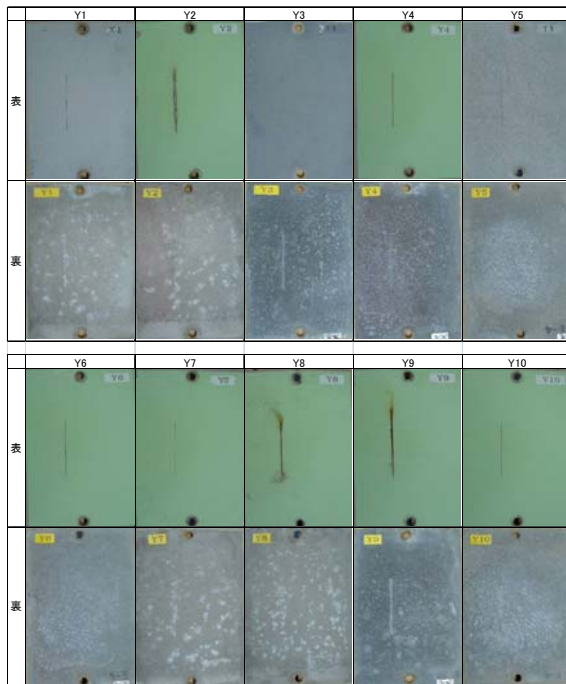


写真-19 金属溶射の補修試験片の暴露2年の外観

評価点	基準写真		発生状況
0			さびの発生が全くない
I			さびが全面まで発生しておらずさび厚も薄い
II			さびが全面まで発生しておりさびは厚いが固着している
III			さびが全面まで発生しておりさびがかなり厚く固着していない

図-1 耐候性鋼材のさび評価基準(案)

4. 耐候性鋼材の素地調整方法の検討

4. 1 研究の方法

耐候性鋼材が異常劣化し塗装で補修する際に塗装の防食性能を十分に発揮させるための素地調整方法の検討を行った。試験片には、千葉県千倉の海岸部に1000mm×1000mm×6mmの板状の耐候性鋼材あるいは普通鋼材を5ヶ月間と10ヶ月間暴露してさびさせたものを用いた。試験は2回に分けて実施し、第1回目にはブラスト処理、第2回目には電動工具処理について実施した。素地調整試験に先立ち対象試験片について、さび外観評価(評価基準は、図-1に示す新たに定めた評価基準(案)と鋼道路橋塗装・防食便覧の評価基準)、セロファンテープ試験、さび厚測定、付着塩分測定を行った。素地調整時には目標素地調整程度に達するまでの処理時間(0.81m²当たり)、処理方法毎に騒音を測定した。処理後には、素地調整で得られた表面粗度と付着塩分測定を行った。

第1回目(ブラスト処理)では、オープンプラスト(研削材;アルミナ)、バキュームブラスト(研削材;グリッド、アルミナ)、バキュームブラスト/高圧水洗で、それぞれ目標素地調整程度 Sa2 1/2, Sa2, Sa1を目指した。第2回目(電動工具処理)では、写真-20に示す電動工具(超合金サンダー、ダイヤモンドツール、ペーパーサンダー(CP-60))で、それぞれ素地調整程度 St3 を目指した。

4. 2 研究の結果

第1回目と2回目の検討結果を表-8, 9に、素地調整前後の状況を図-2, 3に示す。海岸部で10ヶ月間暴露したさびを研削材としてアルミナを用いてオープンプラストとバキュームブラストで目標素地調整程度 Sa2 1/2 までに要した処理時間は、耐候性鋼の方が普通鋼より長かった。オープンプラストの方がバキュームブラストより処理効率は良かった。高圧水洗は塩分除去に効果が認められた。電動工具処理では、ダイヤモンドツールと超合金サンダーは、鋼材を削りすぎる傾向があった。騒音は、バキュームブラスト/高圧水洗が最も小さく、オープンプラストが最も大きかった。表面粗度は、いずれの処理法とも適切な粗さ範囲に入っていた。付着塩分は、塗り替え塗装の基準である 50mg/m² 以下にするのに高圧水洗が有効であることが確認された。なお、バキュームブラストに研削材としてグリッドを使用して素地調整を実施した際、湿度が高かったため、グリッドがさびて固着したので実験を中止した。



写真-20 電動工具

(超合金サンダー、ダイヤモンドツール、ペーパーサンダー)

10.1 鋼橋防食工の補修に関する研究

表－8 耐候性鋼材の素地調整方法の検討結果（第1回目）

試験板No.		4	6	10	11	12	13	15	16	18	22	24	31	32	33	
鋼材種		耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	普通鋼	普通鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	普通鋼	
試験板作成期間		5ヶ月	5ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	5ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	
目標素地調整程度		Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2	Sa 2	Sa 1	Sa 1	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	
素地調整方法		オープンブラスト /アルミナ	バキューム /アルミナ	オープンブラスト /アルミナ	バキューム /グリッド	バキューム /アルミナ	オープンブラスト /アルミナ	バキューム /アルミナ	オープンブラスト /アルミナ	バキューム /アルミナ	オープンブラスト /アルミナ	バキューム /アルミナ	バキューム /高圧水洗	バキューム /高圧水洗	バキューム /高圧水洗	
素地調整前	さび外観評価 (共同研究の評価基準(案)) (良)Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ(不良)	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	
	さび外観評価 (便覧の評価基準) (良)Ⅴ>Ⅳ>Ⅲ>Ⅱ(不良)	4	3	3	3	3	2	3	2	2	3	2	3	2	2	
	セロファンテープ試験	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	さび厚測定: μm (9箇所)	①	242	102	184	167	143	555	335	131	398	368	345	283	195	183
		②	242	69.7	163	152	215	452	324	196	399	406	457	101	154	183
		③	397	147	157	166	279	291	541	165	285	361	318	123	315	329
		④	245	189	210	240	151	318	167	141	300	152	322	156	292	304
		⑤	192	194	180	267	163	361	219	163	259	232	311	101	220	297
		⑥	250	153	120	384	197	228	314	125	196	328	144	109	204	326
		⑦	190	152	213	315	200	173	148	216	225	212	190	227	378	236
		⑧	203	172	182	460	145	138	277	166	190	215	195	251	333	351
		⑨	234	202	255	117	182	275	293	139	398	434	312	212	331	373
		平均	244	153	185	252	186	310	291	160	294	301	288	174	269	287
	塩分測定: mg/m^2 (3箇所)	②	58.1	30.1	53	50.7	94	261	33.5	64.2	272	218	80.6	33.6	33.1	22.1
		⑤	77.7	42.7	43.3	67	56.3	218	138.4	45.7	136	94.5	49.4	60.1	54.8	30.2
		⑧	60.9	43.3	67.6	137.6	101.8	219	34.9	60.2	43.6	351	55.2	80.4	250	124.1
	平均	65.6	38.7	54.6	85.1	84.0	232.7	68.9	56.7	150.5	221.2	61.7	58.0	112.6	58.8	
0.81 m^2 の処理時間 (1 m^2 あたりの処理時間)	9分40秒 (11分59秒/ m^2)	40分23秒 (49分51秒/ m^2)	16分34秒 (20分27秒/ m^2)	グリッド研削剤 固まったため中止		25分04秒 (30分57秒/ m^2)	8分04秒 (9分58秒)	12分55秒 (15分57秒)	2分10秒 (2分40秒)	12分22秒 (15分16秒)	14分26秒 (17分49秒)	5分55秒 (7分18秒)	5分 (6分10秒)	5分 (9分53秒)	8分	
騒音計(dB)			作業位置から 1m-108db 3m-104db 5m-102db 10m-87db 30m-72db	—		作業位置から 1m-106db 3m-98db 5m-92db 10m-86db 30m-72db						1m-88db 3m-81db 5m-77db 10m-72db 30m-65db	1m-91db 3m-83db 5m-79db 10m-71db 30m-66db	1m-88db 3m-80db 5m-75db 10m-70db 30m-63db		
条件													水圧2300bar	水圧2300bar	水圧2300bar	
処理グレード		Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2		Sa 2 1/2	Sa 2	Sa 2		Sa 1	Sa 1	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	Sa 2 1/2	
表面粗度	Ra	17.46	19.65	16.85		15.92	21.72	19.1	19.3	20.66	17.92	15.02	16.28	18.32	18.71	
	Rmax	107.8	113.9	114.8		106.2	155.5	137.2	123.5	131.5	109.2	117.1	120.9	124.4	118.4	
	Rz	86.4	100.8	95.6		89.5	116.2	107.8	90.8	103.6	92	89.3	97.9	108	103	
塩分測定: mg/m^2 (3箇所)	②	120.3	25.7	81		54.5	266	136.1	152.4	129.9	345	94.9	16.2	14	36.7	
	⑤	86.5	43.4	50.7		41.6	141.3	91.4	121.5	112.6	188.5	55.8	26.6	23	11.8	
	⑧	76	38.1	60.8		20.2	50.4	88.8	122.4	51.4	217	39	88.1	32.2	23	
平均	94.3	35.7	64.2		38.8	152.6	105.4	132.1	98.0	250.2	63.2	43.6	23.1	23.8		

表－9 耐候性鋼材の素地調整方法の検討結果（第2回目）

試験板No.		1	2	3	5	8	9	11再	17	19	20	21	23													
鋼材種		耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	耐候性鋼	普通鋼	普通鋼	普通鋼	普通鋼													
試験板作成期間		5ヶ月	5ヶ月	5ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	5ヶ月	10ヶ月	10ヶ月	10ヶ月													
目標素地調整程度		St 3	St 3	St 3	Sa 2 1/2	St 3	St 3	Sa 2 1/2	Sa 1	St 3	St 3	St 3	Sa 2 1/2													
素地調整方法		ペーパーサンダー (CP-60)	ダイヤモンドツール	超合金サンダー	バキューム /グリッド	ダイヤモンドツール	超合金サンダー	バキューム /グリッド	バキューム /グリッド	ペーパーサンダー (CP-60)	ダイヤモンドツール	超合金サンダー	バキューム /グリッド													
素地調整前	さび外観評価 (共同研究の評価基準(案)) (良)Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ(不良)	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ (一部Ⅲ)	Ⅱ (一部Ⅲ)	Ⅱ (一部Ⅲ)	Ⅲ													
	さび外観評価 (便覧の評価基準) (良)Ⅴ>Ⅳ>Ⅲ>Ⅱ(不良)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1													
	セロファンテープ試験	1	1	1	2	2	3	3	1	1	2	2	1													
	さび厚測定: μm (9箇所)	①	348	365	414	264	136	446	293	129	298	175	247	865	69											
		②	477	159	252	304	378	217	196	205	135	366	155	203	496											
		③	469	136	210	323	354	155	233	212	221	235	171	340	478											
		④	487	61	437	231	114	419	254	136	195	234	278	300	719											
		⑤	546	98	358	88	351	475	122	211	154	326	201	328	90											
		⑥	417	136	319	112	87	435	384	584	120	202	321	196	373	143	332									
		⑦	485	397	84	337	110	400	262	259	222	399	107	361	665	104	354	711	94							
		⑧	287	114	415	128	383	119	377	268	224	482	334	62	420	282	602	68								
		⑨	285	151	341	413	349	113	248	346		74	184	372	269	472	220									
		平均	422	122	344	103	345	108	383	118	237	286	276	93	235	107	321	76	273	304	562	91				
	塩分測定: mg/m^2 (3箇所) (検律時間60秒)	②	592	高い部分	177.5	86.4	170.5	22.3	51.7	33	33.7	139.8	45.3	61.7	72.3	高い部分										
		⑤	237	95.8	191.7	149.4	223	43.6	24	47.8	48.8	333	29.7	34.4	18.2	131										
		⑧	137.8	113.7	113.7	89.5	29.8	31.5	27.2	22.7	25.3	320	324	38.7	24.8	さび増量部分										
	平均	322.3	161.0	108.4	141.1	32.5	34.3	34.5	35.9	204.3	133.0	44.9	38.4	950												
	イオン透過抵抗($k\Omega$)	1	0.05	0.04	0.04	0.18	0.69	0.10	0.04	1.40	0.93	0.11	0.05	0.04	0.02	1.70										
	2	0.21	0.15	0.13	0.05	0.61	2.00	0.89	0.14	0.14	0.04	0.66	1.00	2.10												
素地調整	0.81 m^2 の処理時間 (1 m^2 あたりの処理時間)	12分45秒 (15分44秒/ m^2)	11分08秒 (13分45秒/ m^2)	6分32秒 (10分32秒/ m^2)	27分33秒 (34分01秒/ m^2)	10分19秒 (12分44秒/ m^2)	7分57秒 (9分49秒/ m^2)	31分03秒 (38分20秒/ m^2)	10分29秒 (12分57秒)	17分00秒 (20分59秒)	12分00秒 (14分49秒)	9分09秒 (11分18秒)	31分26秒 (38分49秒)													
	騒音計(dB)				作業位置から 1m-103db 3m-90db 10m-74db 30m-60db					作業位置から 1m-93db 3m-86db 10m-65db 30m-52db (工具音なし 48db)	作業位置から 1m-101db 3m-91db 10m-69db 30m-54db (工具音なし 48db)	作業位置から 1m-108db 3m-103db 10m-81db 30m-66db (工具音なし 48db)														
	条件	ペーパー2枚								2.5枚																
素地調整後	処理グレード																									
	表面粗度	Ra	9.3	11.65	9.47	12.85	7.97	13.39	16.3	18.66	16.59	11.95	8.27	4.7	15.52	19.4	19.96	15.89	9.08		13.31	7.73	10.06	17	14.52	19.27
		Rmax	76.3	76.8	70.9	89.6	65.2	105.9	95.8	121.2	108.4	72.3	75	39.1	129.2	139.2	130.5	108.8	57.6		109.7	55.9	84.1	98.7	106.4	121.9
		Rz	51.3	51.6	51.6	80.1	50.4	69.6	82.3	95.2	82.7	58.8	52.6	23.6	98.3	107.3	107.6	96.1	48.6		78.4	35.2	63.6	77	90.6	116.7
	塩分測定: mg/m^2 (3箇所)	②	396		231		558		73.8		64.2		77.7		19.1	39.6	92.9		118.9		66.3		193.5			
		⑤	602		568		548		25.8		79		56.6		47	84.8	116.4		82.9		76		158.6			
		⑧	183.7		250		548		43.2		58.4		43.5		27.2	72.9	403		166.6		123.7		29.6			
	平均	393.9		349.7		551.3		47.6		67.2		59.3		31.1		65.8	204.1		122.8		88.7		126.7			

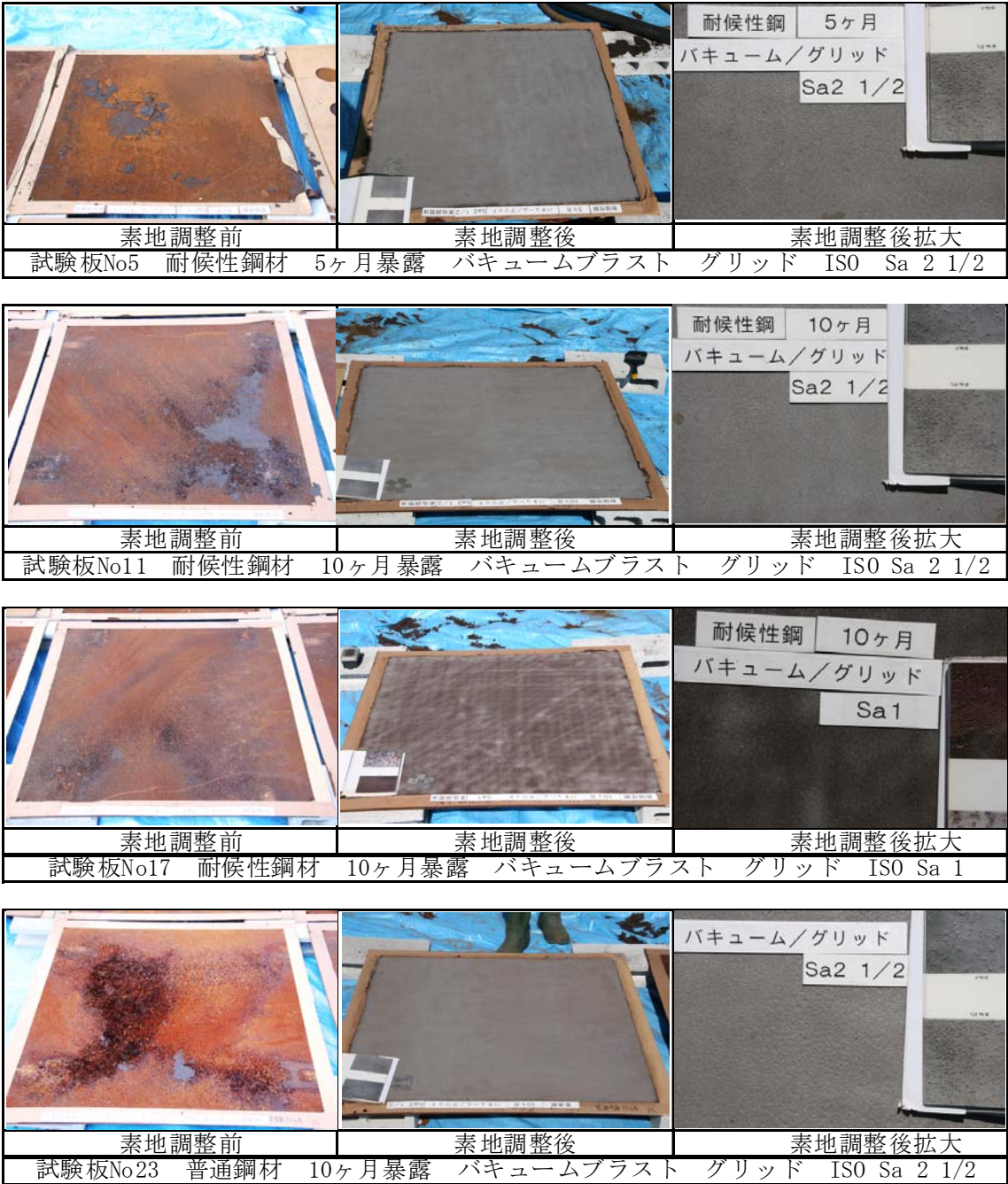


図-2 耐候性鋼材のバキュームブラスト処理前後の状況

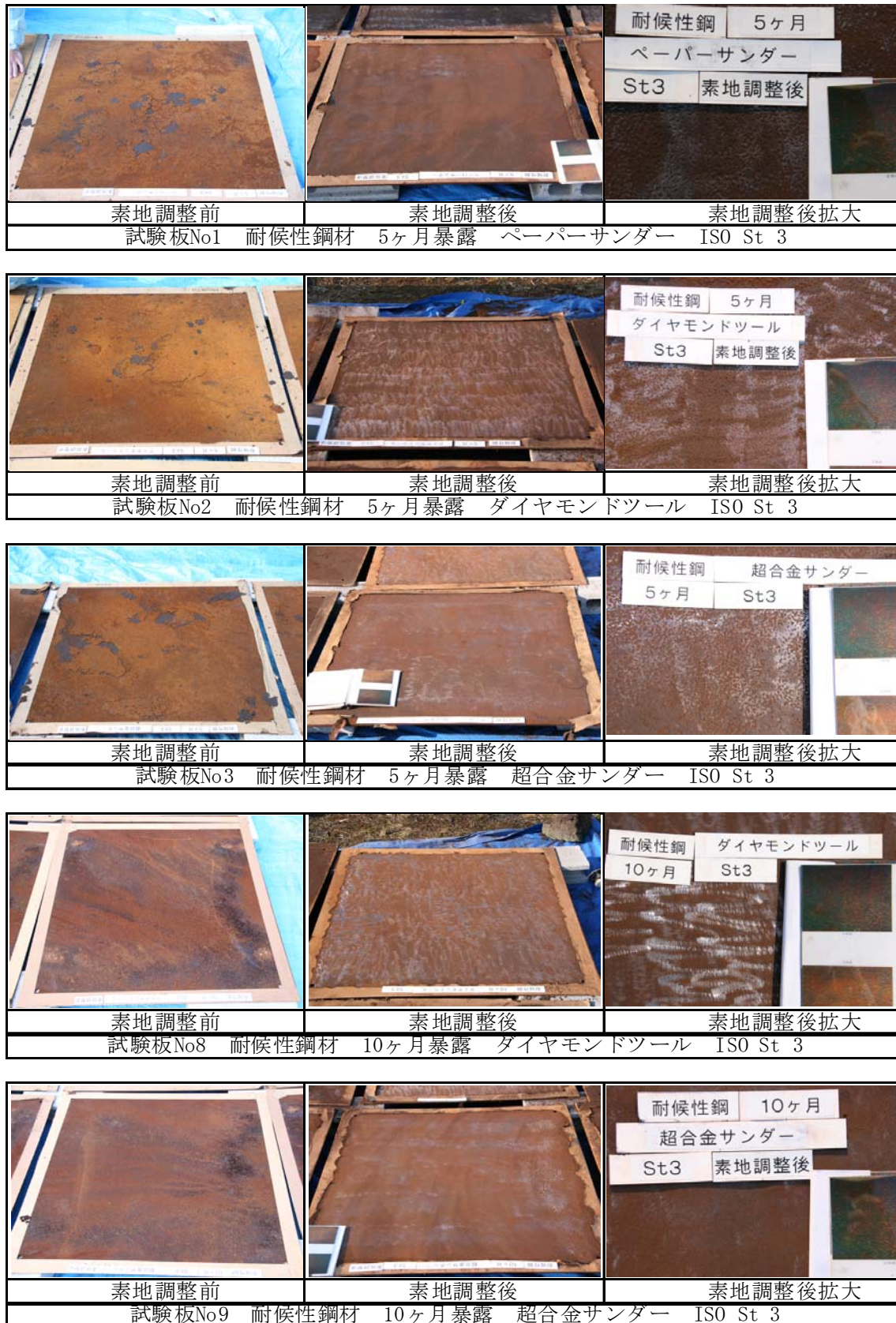


図-3 耐候性鋼材の電動工具処理前後の状況

5. 新規塗料による塗装コスト削減に関する検討

鋼道路橋鋼材の防食塗装は、温度（気温）、水（降雨）や、紫外線などにより徐々に劣化するので、全面的に鋼材腐食が始まる前に塗替え塗装を行うことが不可欠であるため、塗装の塗替えが鋼道路橋の維持管理費用の大きな部分を占めていると言われている。

広く適用されている一般塗装系（鉛系さび止め塗料/長油性フタル酸樹脂塗料中・上塗や、鉛系さび止め塗料/塩化ゴム系塗料中・上塗の塗装系）は、10年～15年程度の周期で塗替え塗装が行われており、維持管理費縮減のためには、これらの塗替え間隔を長期化することが求められている。

このため、一般塗装系が塗装されている鋼道路橋では、素地調整程度2種以上の処理で旧塗膜を完全に除去して重防食塗装系に変更する必要がある。塗替え間隔を長期化することにより、鋼橋塗装のライフサイクルコスト（以下、LCC）を削減することが可能となる。しかし、このような重防食塗装系への変更にあたっては、これまでの一般塗装系による塗替えに比べて、塗替え塗装費が高くなることが課題となっている。

新設、塗替えを問わず重防食塗装系を適用して鋼道路橋塗装のLCCを削減するためには、重防食塗装の塗装コストを削減することが求められている。

重防食塗装系に関わるコストを削減するためには、塗装回数を少なくする（すなわち塗装工賃を削減する）ことが効果的である。このため塗装回数を低減した新規塗料を用いた重防食塗装系の耐久性等に関する検討を行った。

5. 1 新規塗料を用いた重防食塗装系の提案

本研究を開始した時点の代表的な重防食塗装系である鋼道路橋塗装便覧（平成2年版）に記載された一般外面用塗装系C-4塗装系のコスト削減を図った新規塗装系を設定した。供試した塗装系を表-10に示す。コストを削減する方法は、いずれの塗装系も塗装工程数を少なくして塗装費（工賃）を削減している。例えば、C-4塗装系（塗装系No. 1）は、無機ジンクリッチペイント、ミストコート、エポキシ樹脂塗料下塗2回塗り、ふっ素樹脂塗料用中塗、ふっ素樹脂塗料上塗の計6工程である。一方、今回試験に用いた新規塗装系No. 2は、下塗の工程に着目し、エポキシ樹脂塗料下塗を2回塗ることにより乾燥膜厚 $120\mu\text{m}$ を得ていた工程を、エポキシ樹脂塗料下塗1回塗りで

同じ乾燥膜厚が得られる塗料を使用することにより、それ以外の塗料は同じでも工程数を5工程としたもの（鋼道路橋塗装・防食便覧（平成17年版）のC-5塗装系に該当）である。その他、中塗り、上塗りを1回にした中・上兼用塗料や厚膜形上塗塗料などを適用している。

コストは、C-4塗装系を100としてコスト指数で表した。コスト指数の算出は、積算資料により行った。

5. 2 新規塗料を用いた塗装系の耐久性と塗膜特性評価

5. 2. 1 耐久性

新規塗料を用いた重防食塗装系の防食性能は、屋外暴露試験（沖縄県大宜味村、茨城県つくば市）と、促進劣化試験として複合環境腐食促進劣化試験（土研式、JIS式サイクルD）を、促進耐候性試験としてキセノンランプ法試験で評価した。

塗装試験片は、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（除せいで度：ISO 8501-1 Sa2 1/2、研掃材：硅砂、表面粗さ： $25\mu\text{mRz}$ jis目標）によって調整した鋼板（屋外暴露試験片； $300\text{mm}\times 200\text{mm}\times 3.2\text{mm}$ 、促進劣化試験片； $150\text{mm}\times 70\text{mm}\times 3.2\text{mm}$ ）を用いた。それぞれの塗装系を第1層目から最終層まで各々規定膜厚になるようにスプレー塗装した。また、試験片の左下に鋼素地に達するカット（屋外暴露試験片；長さ100mm、促進劣化試験片；長さ50mm）を導入した。各塗装系塗膜の耐候性と防食性の評価は、試験前（初期）および試験開始後定期的に行った。

（1）防食性能

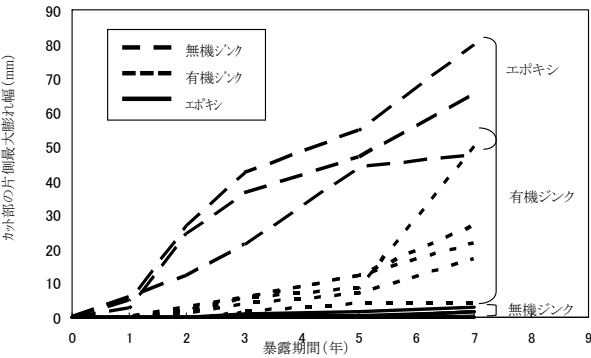
沖縄での屋外暴露試験7年間、および複合環境腐食促進劣化試験（土研式250サイクル、JIS式サイクルD 1000サイクル）の結果、すべての塗装系で試験板一般部に、さび、膨れ、割れ等の塗膜外観の異常は観察されなかった。これらの塗装系はいずれも塗膜厚が $200\mu\text{m}$ 以上あり、十分な環境遮断性を有していたことや、塗装系No. 1～7は防食下地に無機ジンクリッチペイントが、塗装系No. 8～12は有機ジンクリッチペイントが使用されているためと考えられる。試験板のカット部の膨れ幅は、沖縄暴露試験では防食下地のジンクリッチペイントがある塗装系とない塗装系では大きく異なっており、防食下地の有効性が確認された。また、図-4に示すように無機ジンクリッチペイントの方が有機ジンクリッチペイントより防食性が優れていることが確認された。

表－10 新規塗料を用いた供試塗装系

No.	第1層目	第2層目	第3層目	第4層目	第5層目	第6層目	合計 塗膜厚	工程数	鋼道路橋 塗装・防食 便覧の対応 する塗装系	コスト 指数
1	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	ふっ素樹脂 塗料用中塗 (30μm)	ふっ素樹脂 塗料上塗 (25μm)	250μm	6工程	C-4	100
2	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	省検査膜厚 制御塗料 (120μm)	ふっ素樹脂 塗料用中塗 (30μm)	ふっ素樹脂 塗料上塗 (25μm)	－	250μm	5工程	C-5	96
3	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	変性エポキシ 樹脂塗料下塗 (125μm)	厚膜形ふっ素 樹脂塗料上塗 (50μm)	－	－	250μm	4工程	C-5 相当	91
4	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	弱溶剤可溶 厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗 (125μm)	弱溶剤可溶 厚膜型ふっ素 樹脂塗料 上塗 (50μm)	－	－	250μm	4工程	C-5 相当	91
5	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗 (120μm)	中塗上塗兼用 エポキシ シリコン塗料 (55μm)	－	－	250μm	4工程	－	75
6	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	変性エポキシ 樹脂塗料下塗 (125μm)	無機質系 塗料上塗 (30μm)	－	－	230μm	4工程	－	88
7	無機ジンク リッチペイント (75μm)	ミストコート (－)	低溶剤形 変性エポキシ 樹脂塗料 (120μm)	シリコン変性 アクリル樹脂 塗料上塗 (60μm)	－	－	255μm	4工程	－	82
8	高摩擦有機 ジンリッチ ペイント (75μm)	厚膜エポキシ 樹脂塗料下塗 (120μm)	厚膜ふっ素樹脂 塗料上塗 (50μm)	－	－	－	245μm	3工程	Rc-I 相当	74
9	高摩擦有機 ジンリッチ ペイント (75μm)	弱溶剤可溶 厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗 (125μm)	弱溶剤可溶 厚膜型ふっ素樹 脂塗料上塗 (50μm)	－	－	－	250μm	3工程	Rc-I 相当	77
10	高摩擦有機 ジンリッチ ペイント (75μm)	厚膜型エポキシ 樹脂塗料下塗 (120μm)	中塗上塗兼用 エポキシ シリコン塗料 (55μm)	－	－	－	250μm	3工程	－	62
11	高摩擦有機 ジンリッチ ペイント (75μm)	低溶剤形 変性エポキシ 樹脂塗料 (150μm)	シリコン変性 アクリル樹脂 塗料上塗 (60μm)	－	－	－	285μm	3工程	－	71
12	高摩擦有機 ジンリッチ ペイント (75μm)	厚膜エポキシ 樹脂塗料下塗 (120μm)	高耐候ふっ素 樹脂塗料1層 (25μm)	高耐候ふっ素 樹脂塗料2層 (25μm)	－	－	245μm	4工程	－	86
13	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	ふっ素樹脂 塗料用中塗 (30μm)	ふっ素樹脂 塗料上塗 (25μm)	－	235μm	5工程	Rc-III 相当	79
14	弱溶剤系 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	弱溶剤系 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	弱溶剤系 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	弱溶剤系 ふっ素樹脂 塗料用中塗 (30μm)	弱溶剤系 ふっ素樹脂 塗料上塗 (25μm)	－	235μm	5工程	Rc-III	78
15	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	中塗上塗兼用 エポキシ シリコン塗料 (55μm)	－	－	235μm	4工程	－	64
16	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	エポキシ樹脂 塗料下塗 (60μm)	ポリウレタン 樹脂塗料用 中塗 (30μm)	ポリウレタン 樹脂塗料 上塗 (25μm)	－	235μm	5工程	－	71

(注) コスト指数の算出基準

- ・塗料及びシンナー代 : 建設物価2003.1 関東地区・淡彩色価格 (但し、塗料メーカー独自性塗料は各メーカーの積算価格)
- ・塗付量 : 鋼道路橋塗装便覧(平成2年6月)で指定された数量で試算
- ・塗装費 : 建設物価技術資料(1988.1 №159)を引用し、全て工場塗装(新けた塗装)として試算



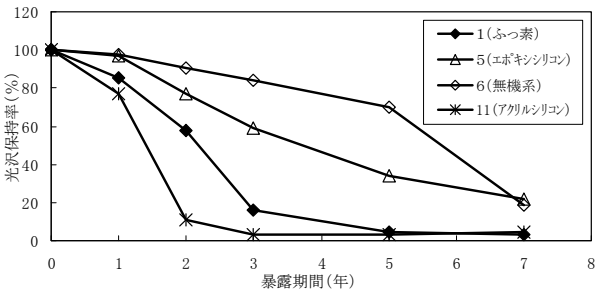
図ー4 カット部膨れ幅（沖縄暴露試験）

(2) 耐候性能

促進耐候性試験（キセノンランプ法）2500時間では、塗装系No. 2, 3, 4, 12（上塗塗料：ふっ素樹脂塗料）や、上塗塗料がふっ素樹脂塗料以外の塗装系No. 6（上塗塗料：無機質系塗料）は、基準としているC-4塗装系の塗装系No. 1（上塗塗料：ふっ素樹脂塗料）と同等な光沢保持率であった。一方、塗装系No. 5, 11は塗装系No. 1より光沢保持率がやや低いが、良好な耐候性を示した。

沖縄とつくばでは、沖縄暴露の方が光沢保持率の低下が大きく厳しい耐候性条件である。沖縄暴露試験では、上塗塗料が厚膜形ふっ素樹脂塗料の塗装系No. 3, 4, 8、高耐侯形ふっ素樹脂塗料の塗装系No. 12は、基準のC-4 塗装系の塗装系No. 1（上塗塗料：ふっ素樹脂塗料）と同等以上の光沢保持率であった。

ふっ素樹脂塗料以外の上塗り塗料では、塗装系No. 5（上塗塗料：エポキシシリコン樹脂塗料）や塗装系No. 6（上塗塗料：無機質系塗料）は、塗装系No. 1（上塗塗料：ふっ素樹脂塗料）よりも高い光沢保持率であり優れた耐候性能を有することが認められた（図-5）。従来、ふっ素樹脂塗料は最も優れた耐候性であると考えられていたが、ふっ素樹脂塗料以外にもふっ素樹脂塗料と同等以上の耐候性が得られる材料があることがわかった。なお、アクリルシリコン樹脂塗料の塗装系No. 11は、光沢保持率が低く耐候性能は劣った。



図ー5 沖縄暴露の光沢保持

5. 2. 2 塗膜特性

新規塗料を用いた重防食塗装系塗膜の塗膜特性として、酸素透過性、透湿度（水蒸気透過度）、一軸引張試験で応力変化（破断ひずみ、破断応力）と、応力緩和能（一定の負荷をかけて経時で応力残存率と時間を測定し、残存応力が 50%になるまでの時間を応力緩和能とした。）を測定した。

ジンクリッチペイントを使用している塗装系では良好な防食性を示したので、ジンクリッチペイントを使用していない系（塗装系No. 13～16）での塗膜特性と防食性の関係を調べた。表ー11に塗装系とその塗膜特性、図ー6に試験板の外観写真を示す。図ー6では、カット部の膨れ幅の領域を黒線で表した。

カット部の膨れ幅で防食性を評価した場合に、酸素透過性や透湿度の環境遮断性はやや劣るが、塗膜の応力緩和能に優れる塗装系No. 14は、環境遮断性には優れるが、応力緩和能が劣る塗装系No. 13, 15よりもカット部の膨れ幅は小さかった。また環境遮断性に優れ応力緩和能を有している塗装系16もカット部の膨れ幅は小さかった。これらの事より、ある一定レベルの環境遮断性を有していれば、応力緩和能が高い塗膜の方が防食性には優れていると言える。

表ー11 塗装系と塗膜特性

No.	酸素透過性	水蒸気透過性		塗膜物性		
				応力緩和	破断ひずみ	破断応力 (最大点 -応力)
	酸素透過係数 ($\times 10^{-11}$)	透湿度 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$)	透湿係数 ($\times 10^{-2}$)	応力残存率の 50%到達時間	最大伸び率 (%)	(kgf/cm^2)
13	0.80	2.6	1.0	120分以上	3.4	236
14	11.00	9.0	3.1	34秒	4.5	171
15	0.80	5.5	1.9	120分以上	3.7	334
16	0.80	2.0	1.9	13分	14.2	182

1) 酸素透過係数の単位 : $\text{cm}^3 (\text{STP}) / \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{cmHg}$
2) 透湿係数の単位 : $\text{g} \cdot \text{cm} / \text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{mmHg}$

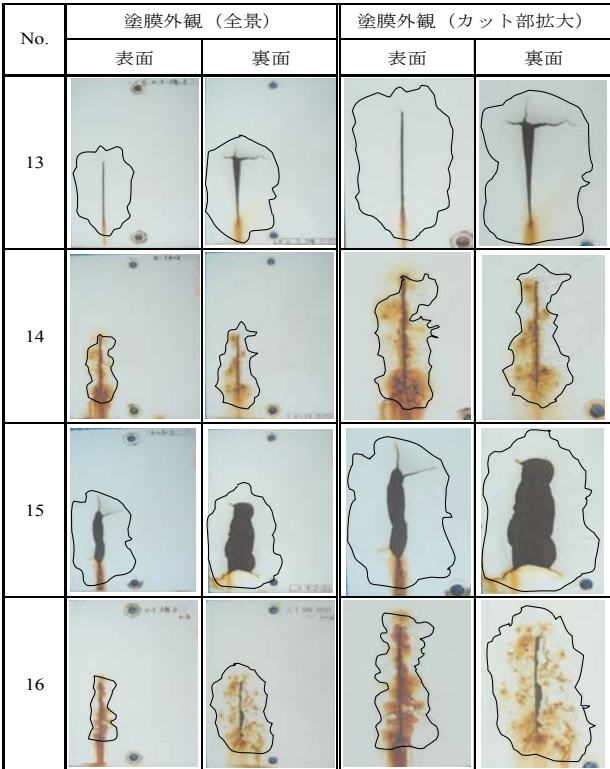


図-6 試験板の外観写真

5. 2. 3 塗膜表面

屋外暴露後の塗膜表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し、フーリエ変換赤外分光光度計で樹脂の劣化過程を評価した。

暴露開始前と沖縄暴露試験3年後の塗膜表面状態を走査型電子顕微鏡 (SEM) による塗膜表面観察、フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) による表面樹脂の劣化の観察をすることで塗膜劣化状態を把握した。

走査型電子顕微鏡 (SEM) の塗膜表面観察では、沖縄暴露3年で塗膜表面に穴が開いていることが観察され、樹脂層がやや劣化進行して消失し始めていることが確認できた。このことは、沖縄暴露3年間で塗膜表面が粗となるため光沢保持率が低下する現象と一致していると考えられる。塗膜表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した例を写真-21に示す。

フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) 観察は、樹脂の劣化過程において変化が顕在化すると予想される特定吸収部位で吸光度比の解析により行った。解析の例として、塗装系No. 3 (上塗塗料: ふっ素樹脂塗料) のフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) 観察でのIRチャートを図-7、特定吸収部位での吸光度比の解析結果を表-12に示す。この例では、ふっ素樹脂塗膜に含まれるウレタン結合のNH結合を示す 1540cm^{-1}

と、エステルの $\text{C}=\text{O}$ を示す 1730cm^{-1} の吸光度比を初期と暴露試験後で比較した。その結果、初期と沖縄暴露3年では吸光度比の変化は生じていなかった。

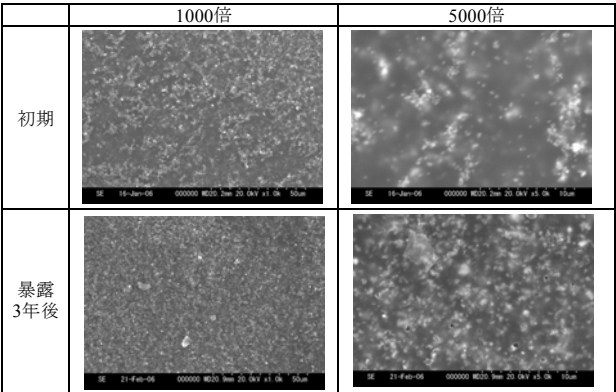


写真-21 SEMによる塗膜表面状態の観察結果 (塗装系No. 4 (ふっ素樹脂塗料))

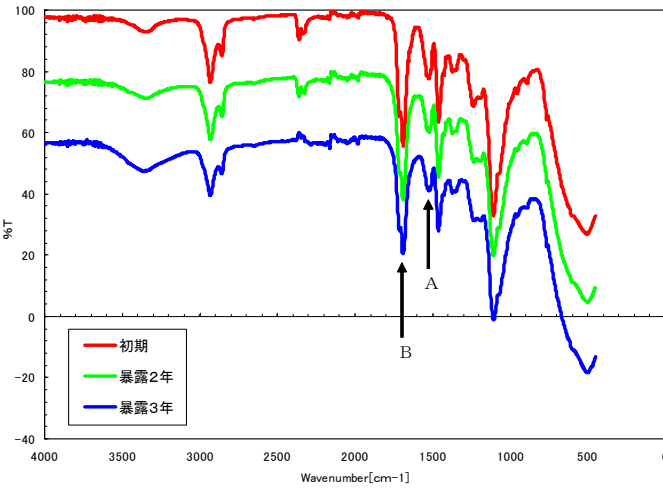


図-7 FT-IRチャート (No. 3 (ふっ素樹脂塗料))

表-12 特定吸収部位での吸光度比の解析結果 (No. 3(ふっ素樹脂塗料))

吸光度比	A/B
初期	0.34
暴露2年後	0.33
暴露3年後	0.34

A : 1540cm^{-1} C-N 伸縮振動, N-H 変角振動 (-CO-NH-)
B : 1730cm^{-1} エステルの $\text{C}=\text{O}$ 伸縮振動

5. 3 研究の結果

重防食塗装系の塗装コストを削減するために、以下のことが有効であることが明らかとなった。

①高耐候ふっ素樹脂塗料、無機質系塗料、厚膜ふっ素樹脂塗料、中塗上塗兼用エポキシシリコン樹脂

塗料は、現行ふっ素樹脂塗料より耐候性能が優れている。

②防食下地（ジンクリッチペイント）の有効性が確認された。また、無機ジンクリッチペイントのほうが有機ジンクリッチペイントより防食性能が優れている。

③新設塗装では、無機ジンクリッチペイント/ミストコート/厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗/中塗上塗兼用エポキシシリコン樹脂塗料の塗装系で 25% の塗装コストの削減できる。

④本検討は、新設 C-4 塗装系と対比して性能とコストを比較しているが、No. 9 以降の塗装系は、塗替え塗装にも適用ができるので、塗替え塗装では、高摩擦有機ジンクリッチペイント/弱溶剤形厚膜エポキシ樹脂塗料下塗/厚膜ふっ素樹脂塗料と、高摩擦有機ジンクリッチペイント/厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗/中塗上塗兼用エポキシシリコン樹脂塗料の塗装系で 38～23% の塗装コストが削減できる。

6. まとめ

本研究の成果は以下の通りである。

(1) 耐候性鋼材、熔融亜鉛めっき、金属溶射を適用したり、異常劣化したため塗装で補修した橋梁 100 橋の実態を調査した。

①耐候性鋼橋梁 90 橋を調査した結果、全ての部位で保護性さびを形成しているものはなく、部分的にこぶ状さびや層状さびを生成していた。このため、耐候性鋼橋梁については、その適用環境条件の見直しが必要であることが明らかとなった。

②異常腐食した耐候性鋼橋梁を塗装で全面補修した橋梁を調査した結果、ブラストで素地調整し重防食塗装系で塗装した橋梁は、十分な素地調整ができなかった狭隘部以外は良好な状態であった。一方、電動工具処理で素地調整程度 3 種で塗装した橋梁の塗膜は劣化していた。

③熔融亜鉛めっき橋梁で異常劣化が生じたため、架設後 10 年、15 年でブラスト処理後、重防食塗装系で補修塗装した橋梁は、10 年、5 年経過後も塗膜は、部材端部や狭隘部以外は良好であった。

④金属溶射に塗装を併用した橋梁を調査した結果、金属溶射が付きにくい部材端部や接合部にさびが発生していた、また、ステンレスボルトを適用された橋梁では、異種金属接触腐食による腐食が生じていた。

⑤塗装橋梁を擬合金溶射で補修し 10 年経過した橋梁を調査した結果、漏水部と十分な素地調整や溶射ができない狭隘部に腐食が生じていた。また、粗面形成材から溶射皮膜が浮いたり剥がれている部分があった。

(2) 耐候性鋼材、熔融亜鉛めっき、金属溶射などの防食工が劣化した場合の塗装や金属溶射で補修した試験片の暴露 2 年目の調査を行った。その結果、異常劣化した耐候性鋼材の補修塗装では、ブラスト処理したものは良好であったが、電動工具処理した試験片には異常が見られた。異常劣化した熔融亜鉛めっきを塗装で補修したもののうち一部の電動工具処理した試験片には異常が見られたが、ほとんど塗膜に異常は見られなかった。金属溶射が全面劣化した場合と部分劣化した場合の一部にさび、または膨れがみられたが、ほとんどの試験板は良好であった。

(3) 耐候性鋼材の補修塗装時の素地調整方法を検討した結果、電動工具処理では不十分であり、ブラスト処理が不可欠であることが明らかとなった。

今後、各種防食工の補修試験片の追跡調査を行い、補修塗装などの長期的な耐久性を明らかにする必要がある。

(4) 新規塗料による塗装系のコスト削減について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

①新設塗装では、無機ジンクリッチペイント/ミストコート/厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗/中塗上塗兼用エポキシシリコン樹脂塗料の塗装系で 25% の塗装コストの削減できる。

②塗替え塗装では、高摩擦有機ジンクリッチペイント/弱溶剤形厚膜エポキシ樹脂塗料下塗/厚膜ふっ素樹脂塗料と、高摩擦有機ジンクリッチペイント/厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗/中塗上塗兼用エポキシシリコン樹脂塗料の塗装系で 38～23% の塗装コストが削減できる。

参考文献

- (1) 後藤宏明、守屋進他：耐候性鋼材の塗装による補修方法の検討、材料と環境、Vol. 59、No. 1、pp10～17、2010 年 1 月
- (2) 杉田好春、守屋進他：耐候性鋼橋梁の外観調査結果、第 29 回防錆防食技術発表大会講演予稿集、pp33～36、2009 年 7 月
- (3) 守屋 進、浜村寿弘、齋藤 誠他：鋼道路橋重防食塗装系の性能評価に関する研究、土木学会論文集 E Vol. 66 No. 3、pp221～230、2010. 7

