

2. 鋼構造物試験体の耐久性確認試験に関する報告 — 腐食環境の厳しい場所（沖縄地区）において —

技術委員会 製作小委員会

前田 博 前川 清隆

平野 晃 大庭 哲也

1. はじめに

鋼構造物における維持管理コストを低減することを目的として、(社)日本橋梁建設協会では、(独)土木研究所と防食方法の耐久性に関する共同研究を行っている。塗装系では平成3年4月から、金属溶射皮膜では、平成14年6月から、それぞれの防食方法における耐久性の検証を目的として、大型試験桁および試験板を設置して暴露試験を開始し、継続的な観察を行ってきた。本報告は、塗装系に関しては15年経過の総括報告、金属溶射に関しては7年経過の中間報告を行うものである。

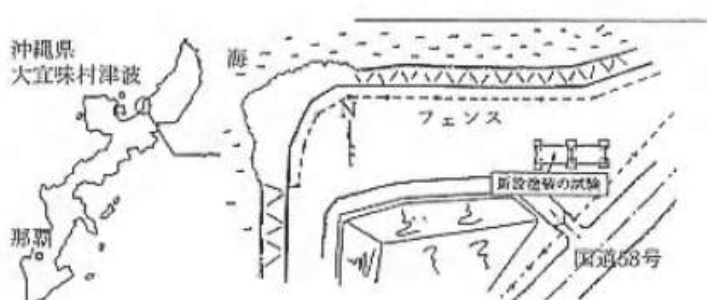


図-1 沖縄建設材料耐久性試験施設

3. 試験方法

3. 1 暴露試験場所

沖縄建設材料耐久性試験施設（沖縄県大宜味村宇津波 図-1）は、東シナ海に面し、海岸線に近接しているため、特に冬の季節風の影響を強く受け、状況によっては波飛沫を直接受ける腐食環境の非常に厳しい場所である。

3. 2 構造物試験体（塗装系用）

2,200mm(W)×1,500mm(H)×4,000mm(L)の鋼床版桁構造物で、塗装面積が約60㎡の構造物を「新設仕様」と「塗替え仕様」の計2体を製作・設置した（写真-1）。



写真-1 左：新設仕様 右：塗替え仕様

2. 試験目的

塗装された構造物の形状や部位によって防食性や耐候性などの耐久性が異なる。このような耐久性の違いは、試験片での加速劣化試験および暴露試験では十分に評価できないことから、実構造物と同様な塗膜劣化状態を示す大型の構造物試験体を製作して、塗膜劣化条件の厳しい沖縄において暴露試験を実施して確認する。金属溶射に関しては、各種金属溶射および塗装との組合せによる長期耐久性を塗装による重防食仕様と比較して性能を確認することを目的としている。

1) 新設仕様

一般外面は、長さ方向に6分割(①～⑥)で塗り分けを行った。色相による違いも確認するためウェブ上下で色分けを行った（表-1、図-2）。

(2) 塗替え仕様

塗替え塗装系の耐久性を確認するため、一般外面については、ブラスト処理後に鉛系さび止めペイントを1回塗装(35μm)し、1年間暴露の後、長さ方向に4分割(①～④)で塗り分けを行った。素地調整は、ウェブ上下で区分し、上側を動力工具処理(St3)、下側をブラスト処理(Sa2)とした（表-2、図-3）。

表-1 新設仕様

区分	区分①	区分②	区分③	区分④	区分⑤	区分⑥
素地調整	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}
上塗り	長油性フタル酸樹脂塗料上塗り	塩化ゴム系塗料上塗り	シリコンアルキド酸樹脂塗料上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り

表-2 塗替え仕様

区分	区分①	区分②	区分③	区分④
下塗り	---	---	変性エポキシ樹脂塗料下塗り	有機ジンクリッチペイント
	変性エポキシ樹脂塗料下塗り×2	変性エポキシ樹脂塗料下塗り×3	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	変性エポキシ樹脂塗料下塗り×2
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り

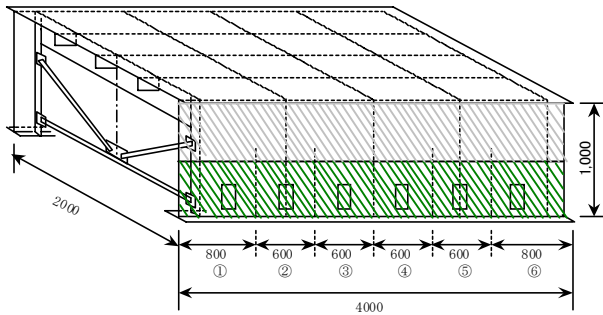


図-2 新設仕様

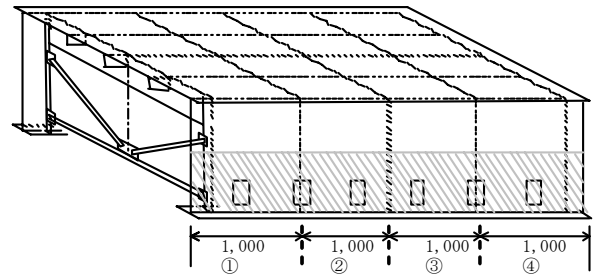


図-3 塗替え仕様

3. 3 構造物試験体（金属溶射皮膜用）

塗装系における新設仕様（表-1、図-2、区分①～⑤）および塗替え仕様（表-2、図-3、区分①、②）は、暴露10年経過をもって金属溶射皮膜の耐久性確認へ転用した（表-3、表-4）。

(1) 新設仕様

図-2における区分①～⑤をブラストして金属溶射を施工（JIS溶射仕様へ転用）。

(2) 塗替え仕様

図-3における試験桁の区分①、②を動力工具処理とブラスト処理して金属溶射を施工（擬合金溶射仕様へ転用）。

表-3 擬合金溶射（塗替え仕様転用）

区分	区分A	区分B	区分C	区分C'	区分D
素地調整	2種+粗面	2種+粗面	1種+粗面	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}
溶射	亜鉛・アルミニウム擬合金	亜鉛・アルミニウム擬合金+ふっ素上塗り	亜鉛・アルミニウム擬合金+ふっ素上塗り	亜鉛・アルミニウム擬合金+ふっ素上塗り	亜鉛・アルミニウム擬合金+ふっ素上塗り

表-4 JIS溶射（新設仕様転用）

区分	区分H	区分I	区分J	区分K	区分L
素地調整	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}	ブラストSa2 ^{1/2}
溶射	亜鉛	アルミニウム	亜鉛・アルミニウム合金	亜鉛・アルミニウム合金+ふっ素上塗り	溶射比較用(C-4塗装系)

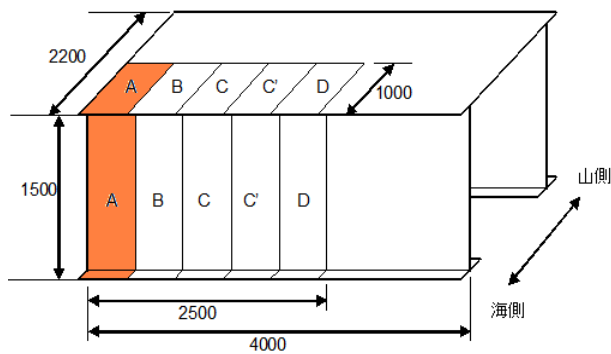


図-4 塗替え仕様

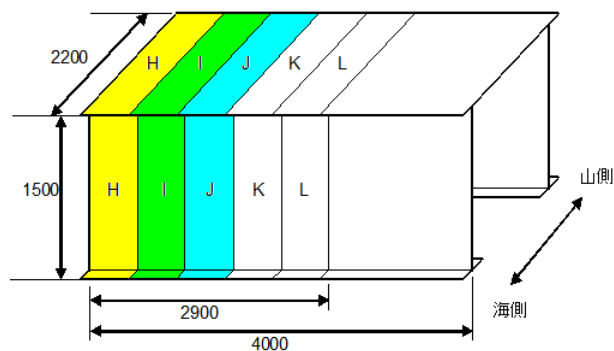


図-5 新設仕様

4. 試験結果

4. 1 塗装試験析

4. 1. 1 塗膜外観

新設仕様では、区分①、②、③は暴露5年目でさび、われなどの劣化が顕著であった。区分④、⑤は一部で打傷によるさびの発生がみられたが、その他は暴露10年目でも良好な防錆性を示した。区分⑥は暴露15年経過時でも一般部（主桁ウェブ外面）には、著しい発錆はみられなかった。

塗替え仕様では、区分①、②では区分①のエッジ部で5年目までにさびが発生したが、一般部では良好な防錆性を示した。区分③、④は暴露15年目で吊金具、エッジ部等に発錆がみられたが、一般部（主桁ウェブ面）については、著しい発錆はみられなかった。ただし、主桁ウェブ面に各々6箇所塗り残し部（100×200mm）を設置し、1年間暴露の後に孔食が発生した箇所においては、動力工具処理ではさび層を十分に除去できなかったため、すべての塗装系でふくれが確認された（表-5）。




4. 1. 2 光沢保持性

新設仕様におけるポリウレタン樹脂塗料上塗の光沢保持率は、色相により差はあるものの15年経過で20%程度であった（図-6）。塗替え仕様の一般部（主桁ウェブ面）では、ふっ素樹脂塗料の光沢保持率は、5年目から急激に低下し、10年目以降は10%以下の値を示した（図-7）。本暴露場は、飛来塩分が多く、高温、高湿度の環境にあり、塗膜表面が濡れている状況であることが多く、光沢値の測定に影響を与えていることが考えられ、調査年度によってバラツキが見られた。

4. 1. 3 変退色

新設仕様におけるポリウレタン樹脂塗料上塗は、15年目で、色差 $\Delta E > 2$ となった。色差については、色相による差は見られなかった（図-8）。塗替え仕様においては、ふっ素樹脂塗料上塗の一般部（主桁ウェブ面）は、15年目で、 $\Delta E > 2$ となった（図-8）。目視で明らかな変化を認識できるのは $\Delta E \geq 5$ であることから良好な状態であると考えられる。

表-5 動力工具処理部における残存塩分の確認（塗替え仕様）

塗り残し部（暴露後）	塗り残し部（ブラスト後）	塗り残し部（動力工具処理後）
		

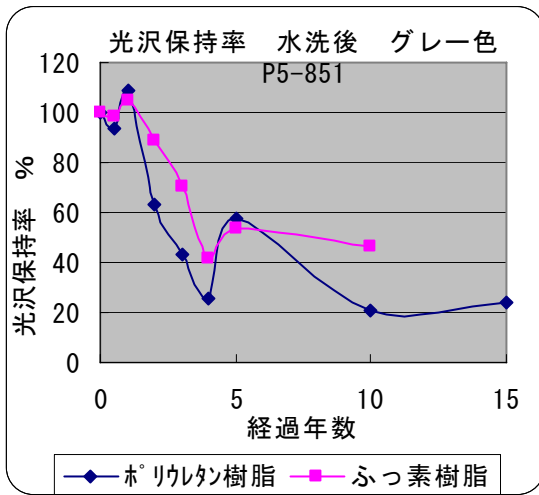


図-6 新設仕様における光沢保持率

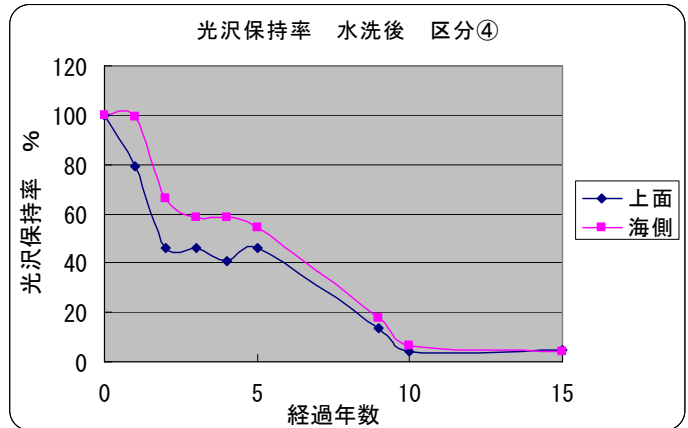


図-7 塗替え仕様における光沢保持率

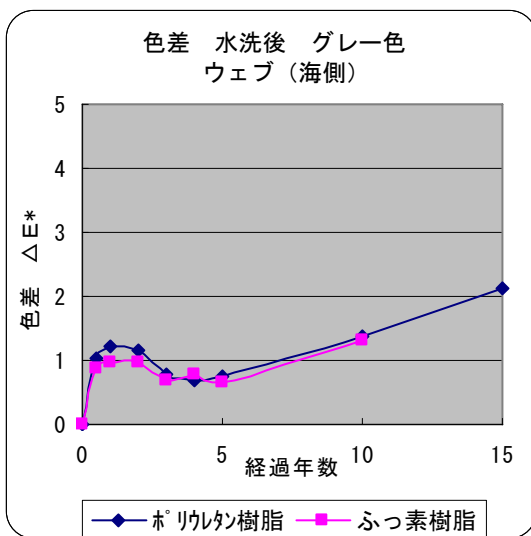


図-8 新設仕様における色差

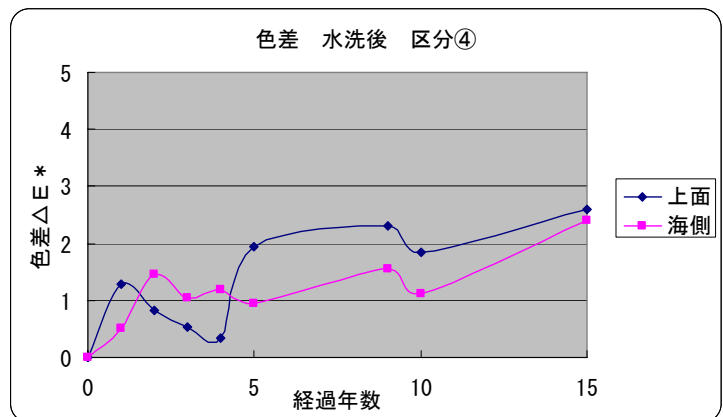


図-9 塗替え仕様における色差

4. 1. 4 付着力

新設仕様における付着力は、下塗りにMIO塗料をもちいた区分2以外の塗装区分では2.0MPa以上確保されており、良好な状態であった。塗替え仕様における付着力は、2次素地調整がブラスト処理および動力工具処理いずれの箇所においても2.0MPa以上の値となっており、良好な状態を保っていた。

4. 2 金属溶射試験桁

4. 2. 1 皮膜厚さ測定結果

皮膜厚さおよび測定位置図を図-10に示す。

4. 2. 2 外観調査

(1) 調査項目

試験桁は、さび、はがれ、ふくれ、われ等の調査を桁の外側、内側で行い、試験板は、カット部のふくれ

最大幅、塗装外観(さび、ふくれ等)の調査を裏・表で行う。双方とも詳細調査は1、3、5、7、10年目とする。ただし、皮膜厚さ測定は1年おきに実施する。表-6および写真-2~5に7年目の調査結果を示す。

(2) 観察結果

①〔仕様A(擬合金)部分〕写真-2, 表-6

上フランジ下面(外側)に3年目から確認された赤さびの発生部は、7年目には下面の約75%程度にまで進行していた。桁内面の下部に5年目から確認された赤さびの発生箇所は、7年目にはさらに進行して大きくなり、一部はがれが生じていた。桁内面には新たに点さび発生部が4箇所確認された。本試験桁は、前試験において塗替え仕様の検討を行っており、ほぼ全面を意図的に発錆させた経歴がある腐食

の著しい部材であったことから、動力工具処理で除去できなかった孔食中の塩分および桁内部に付着・堆積した塩分の影響により、溶射皮膜の劣化が促進され、さびが進行した可能性が考えられる。

②【仕様H(亜鉛)】写真-3, 表-6

上フランジ(外側)は、溶射皮膜の溶出が3年目より起こり7年経過時点でさらに溶出が進行し、部分的に素地露出部で赤さびの発生が確認された。上フランジ(内側)には飛来塩分の付着と、一部腐食生成物の発生はみられるが、素地鋼板の腐食(赤さびの発生)には至っていない。ウェブ面については、内側・外側共に変色傾向(黒灰色)はあるが、溶射皮膜厚さの変化はほとんど無く、特に問題となるような部分は無い。下フランジ(内側)は亜鉛溶射皮膜の腐食生成物である白さびが多く発生しており、白さびの部分は皮膜厚さの増加傾向(+100 μ m程度)がみられる。

③【仕様I(アルミニウム)】写真-4, 表-6

試験桁外側はどの部位においても白い灰色を呈しており、皮膜厚さに関しても7年間は、ほとんど変化が見られない。試験桁内側は上フランジ内側部分に飛来塩分の付着はあるが、他の部分は外側と同様であり、皮膜厚さも7年間でほとんど変化していない。

④【仕様J(亜鉛・アルミニウム合金)】写真-5

試験桁外側はどの部位においても全体が灰色で、皮膜厚さもこの7年間でほとんど変化していない。試験桁内側は全体が黒灰色で、ウェブ面内側のボルト孔部分に封孔皮膜の白化現象がみられた。皮膜厚さもこの7年間でほとんど変化していない。

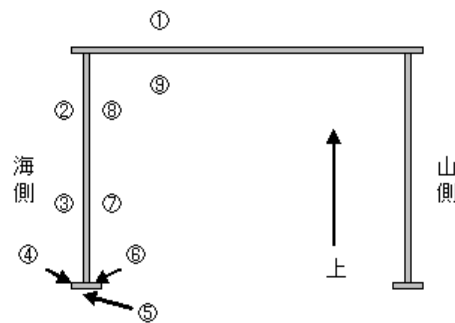
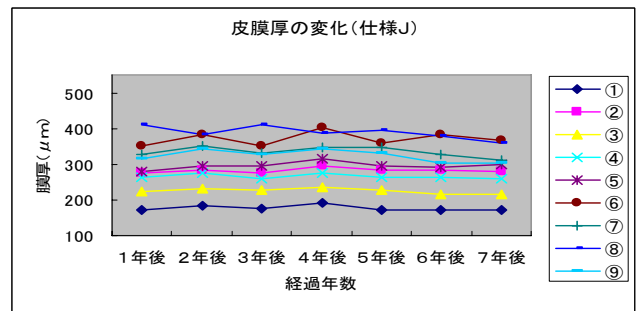
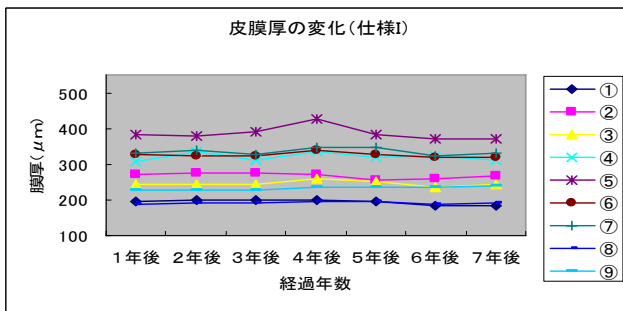
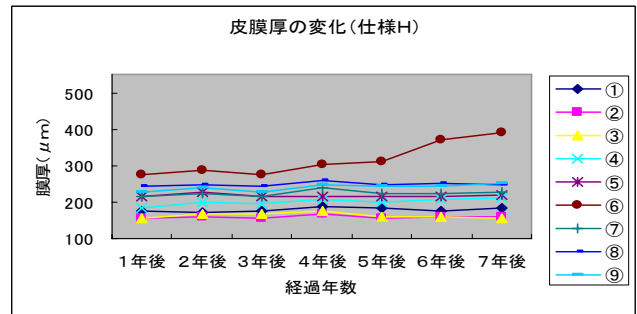
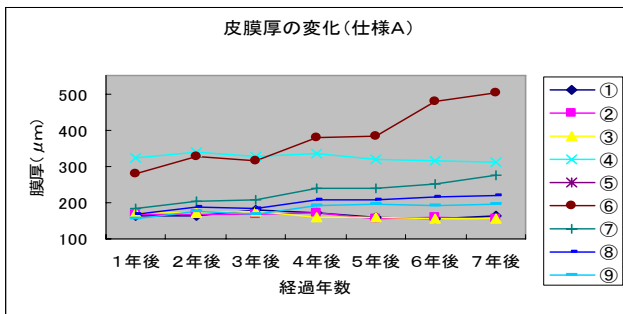


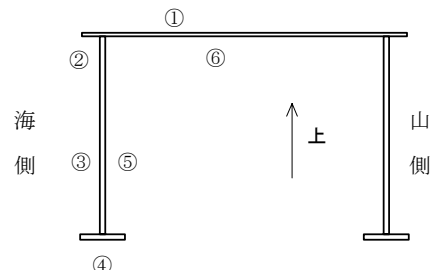
図-10 溶射皮膜厚さおよび測定位置

表-6 外観観察結果

<溶射試験桁 外面外観>

<溶射試験桁 内面外観>

部位	外観	仕様				部位	外観	仕様			
		仕様A	仕様H	仕様I	仕様J			仕様A	仕様H	仕様I	仕様J
		経過 7年後						経過 7年後			
①	さび	◎	×	○	◎	⑤	さび	×	◎	◎	◎
	はがれ	○	◎	◎	◎		はがれ	△	◎	◎	◎
	われ	◎	◎	◎	◎		われ	◎	◎	◎	◎
	ふくれ	◎	◎	◎	◎		ふくれ	◎	◎	◎	◎
	その他	なし	消耗有り	黒点	なし		その他	なし	なし	なし	なし
②	さび	×	◎	◎	◎	⑥	さび	◎	◎	◎	◎
	はがれ	◎	◎	○	◎		はがれ	◎	◎	◎	◎
	われ	◎	◎	◎	◎		われ	◎	◎	◎	◎
	ふくれ	◎	◎	◎	◎		ふくれ	◎	◎	◎	◎
	その他	なし	なし	なし	なし		その他	なし	なし	生成物	なし
③	さび	◎	◎	◎	◎	備考	⑤赤さび10%	⑤白さび大	⑤白さび大	⑤白さび大	
	はがれ	◎	◎	◎	◎		⑥白さび中	⑥白さび大	⑥白さび大	⑥白さび大	
	われ	◎	◎	◎	◎		下フランジ下面 1×6cmさび リブさび1ヶ、 生成物	下フランジ下面 生成物あり	下フランジ下面 生成物大1ヶ	⑤白さび減少 下フランジ下面 さび2ヶ	
	ふくれ	◎	◎	◎	◎						
	その他	なし	なし	なし	なし						
④	さび	◎	◎	◎	◎	備考					
	はがれ	◎	◎	◎	◎						
	われ	◎	◎	◎	◎						
	ふくれ	◎	◎	◎	◎						
	その他	なし	なし	生成物	なし						
備考	①径1mm以下 はがれ15% ②さび75% ③白さび小	①さび10% 海側大、山側小	①全面黒点(2mm大) ②白さび小 一部ハカレ1mm大 20ヶ ③白さび大 ④白さび大 生成物3ヶ	②白さび大 ③白さび大 ④白さび大							



部位① (上フランジ上面)



部位② (上フランジ下面、ウェブ上側)



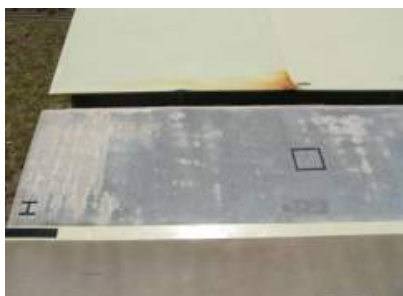
3年後

5年後

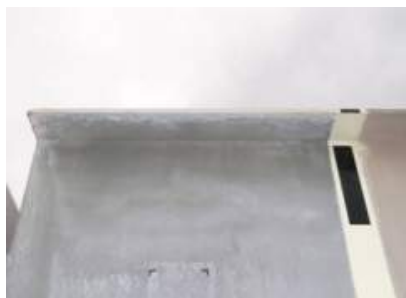
7年後

写真-2 仕様A (擬合金溶射)

部位①（上フランジ上面）



部位②（上フランジ下面、ウェブ上側）



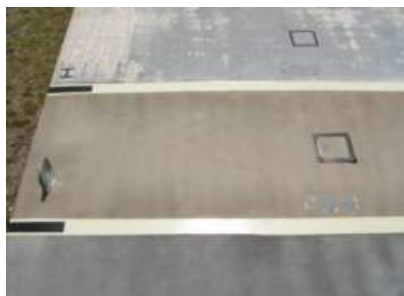
3年後

5年後

7年後

写真-3 仕様H（亜鉛：JIS 溶射）

部位①（上フランジ上面）



部位②（上フランジ下面、ウェブ上側）



3年後

5年後

7年後

写真-4 仕様I（アルミニウム：JIS 溶射）

部位①（上フランジ上面）



部位②（上フランジ下面、ウェブ上側）



3年後

5年後

7年後

写真－5 仕様J（亜鉛・アルミニウム合金：JIS 溶射）

5. まとめ

5. 1 塗装試験桁に関して

鋼道路橋塗装便覧仕様を中心とした各種塗装系の比較は、大型の構造物試験体を利用し、精度の良い防食性と耐候性の評価結果が得られた。特に重防食仕様であるC塗装系が非常に厳しい環境下での10年以上の暴露においても防食性と耐候性に優れることを立証できた。ただし、塗替えにおいて動力工具処理や手工具処理によるさびの除去が不十分な場合に、塗替え後にふくれが発生することが確認されており、塗替え時の素地調整においては、ブラスト処理が長期耐久性の点において望まれる。また構造物の形状や部位による防食性の差については、十分な素地調整や膜厚確保が困難であるフランジ面のエッジ部および下面、リブ、添接部が、一般部と比べると防食性に劣ることが再確認できた。今後、鋼橋塗装のLCCを低減するためには、新設塗装においては、塗膜厚不足の生じ易い、部材角部および高力ボルト部について増し塗り（先行はけ塗り）や防錆処理高力ボルトの活用が望まれる。塗替え塗装においては、定期点検の実施と適切な補修時期・方法の選定が必要となる。

5. 2 金属溶射試験桁に関して

金属溶射+封孔処理の4種類の仕様における7年経過後の暴露試験結果は、亜鉛溶射に関しては、腐食環境の厳しい場所で使用する場合、塗装と併用することが望ましい。

アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金については、現在も十分な耐久性を保持している。

亜鉛・アルミニウム擬合金溶射において、部分的な腐食が確認できる事に関しては、沖縄地区の海浜環境で暴露された鋼材に動力工具処理による素地調整を行ったことから、塩分の除去が不十分であり、残存している塩分の影響が原因であると推定される。このことを確認するため、試料採取を行い詳細な分析を実施中である。塩分環境で劣化した塗装、めっき、金属溶射および耐候性鋼橋を金属溶射（擬合金）で補修を行う場合は、素地調整後の残留塩分の管理が重要な要素になると考えられる。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、御協力頂きました内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所、日本溶射工業会、防食溶射協同組合、MS 工法協議会の関係各位に謝意を表します。