

大型試験桁を用いた金属溶射の耐久性調査 —沖縄地区での21年目調査報告—

技術委員会 製作小委員会

桑名 弘暁 森井 茂幸 大庭 哲也 花輪 務

1. はじめに

製作小委員会 防食部会では、(国研) 土木研究所との共同で金属溶射の耐久性検証を目的として、沖縄県大宜味村にある沖縄建設材料耐久性試験施設にて 2002 年 6 月より大型試験桁を用いた暴露試験を行っている。今回の報告は、この沖縄地区における金属溶射試験桁暴露試験について、21 年目の調査報告を行う。

2. 試験の目的

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種々の防食方法が検討されており、特に近年では金属溶射が有効な手段として注目されている。鋼道路橋塗装・防食便覧(平成17年12月(社)日本道路協会)において、亜鉛やアルミニウムまたはその合金を吹き付けて皮膜を形成する溶射法(以下 JIS 溶射)と、亜鉛とアルミニウムを同時に吹き付けることで皮膜を形成する溶射法(以下擬合金溶射)が代表的な防食技術として示されたことにより、金属溶射の施工事例は増加している。しかしながら、その耐久性と経年変化を調査確認したデータは少なく、長期耐久性データの蓄積と維持管理方法の確立が重要である。このことより、腐食環境の厳しい沖縄地区に大型試験桁を設置し、その追跡調査により金属溶射の長期耐久性を確認している。

3. 試験概要

3. 1 調査場所

暴露試験を実施している(国研)土木研究所の沖縄建設材料耐久性試験施設(沖縄県大宜味村字津波 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。



図-1 沖縄建設材料耐久性試験施設

3. 2 調査内容

調査する暴露試験体の防せい仕様は、擬合金溶射と JIS 溶射に対し封孔処理を施した仕様、塗装を組合わせた仕様、そして比較対象として重防食塗装仕様の合計 10 種類とし、長期耐久性を追跡調査にて確認している。

各種金属溶射および比較用の塗装は大型試験桁に施工し、暴露している。大型試験桁は鋼床版鉄桁構造をした 2,200mm(W)×1,500mm(H)×4,000mm(L)、塗装面積が約 60 m²の構造物であり、2 台を設置した(図-2参照)。そのうちの 1 台を擬合金溶射試験桁、1 台を JIS 溶射試験桁とした。

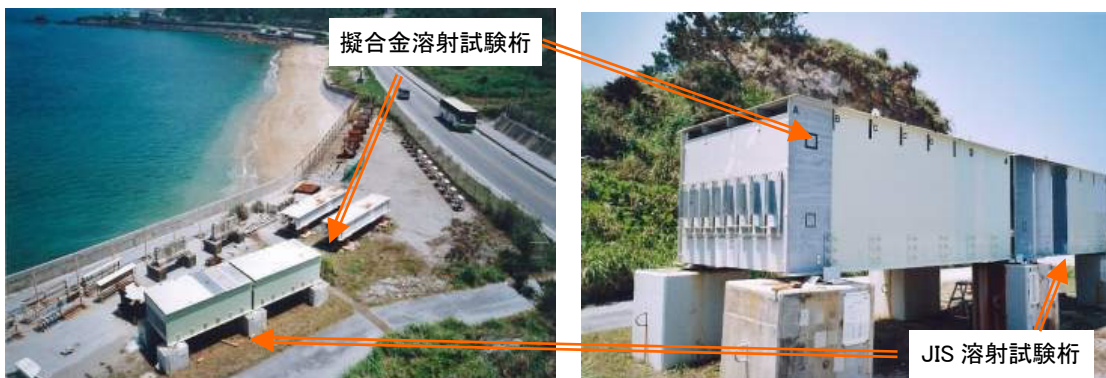


図-2 大型試験桁

3. 2. 1 擬合金溶射試験桁

擬合金溶射試験桁はすべて亜鉛・アルミニウム擬合金溶射であり、素地調整程度の違い、粗面化処理の有無、塗装の有無、封孔処理の仕様の組合せにより、仕様A～Dの計5つの仕様にて比較を行った。仕様および塗分けは図-3、表-1のとおりである。図-4に設置した試験桁の全景を示す。なお、各仕様は試験桁の上フランジの半面および海側ウェブに施工を行い、その他の箇所は本調査の対象外である。

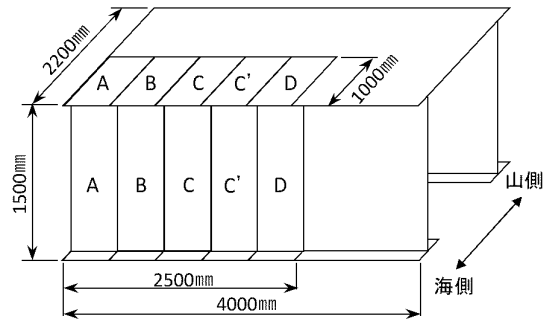


図-3 擬合金溶射試験桁 塗分け

表-1 擬合金溶射試験桁 溶射仕様

部位	仕様	素地調整	粗面化処理	溶射	封孔処理	下塗り(上段)・中塗り(下段)	上塗り
腹上板外フランジ海上側面	A	2種	あり	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 100 μ m	あり	—	—
	B	2種	あり	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 100 μ m	あり	変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m
	C	1種	あり	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 100 μ m	あり	変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m
	C'	1種	なし	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 100 μ m	あり	変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m
	D	1種	なし	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射 100 μ m	ミストコート	変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m



図-4 擬合金溶射試験桁 全景 (左: 腹板面、右: 上フランジ上面)

3. 2. 2 JIS 溶射試験桁

JIS 溶射試験桁は、溶射仕様、塗装の有無の組合せ等により仕様H～Kの4つの仕様とし、さらに比較対象として重防食塗装の仕様Lを加え、計5つの仕様にて比較を行った。仕様および塗分けは図-5、表-2のとおりである。図-6に設置した試験桁の全景を示す。なお、各仕様は試験桁の上フランジの全幅および海側ウェブに施工を行い、その他の箇所は本調査の対象外である。

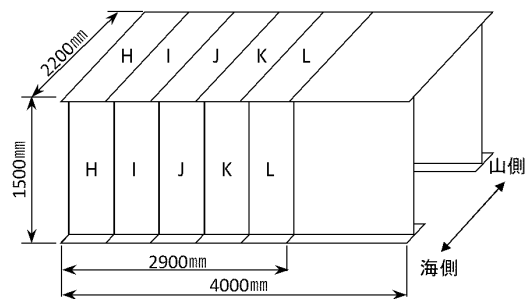


図-5 JIS 溶射試験桁 塗分け

表-2 JIS 溶射試験桁 溶射仕様

部位	仕様	素地調整	溶射	封孔処理	下塗り(上段)・中塗り(下段)	上塗り
腹上板外フランジ海上側面	H	1種	亜鉛溶射 100 μ m	あり	—	—
	I	1種	アルミニウム溶射 100 μ m	あり	—	—
	J	1種	亜鉛・アルミニウム合金溶射 100 μ m	あり	—	—
	K	1種	亜鉛・アルミニウム合金溶射 100 μ m	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m
	L	1種	無機シリケートペイント 75 μ m	ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗り 60 μ m \times 2 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30 μ m	ふっ素樹脂塗料上塗り 25 μ m



図-6 JIS 溶射試験桁 全景 (左：腹板面、右：上フランジ上面)

3. 3 試験桁についての説明

2台の試験桁は、1991年から塗装系暴露試験において新設仕様ならびに塗替仕様の検討に使用した後、2002年に本報告の溶射系暴露試験のために転用している。塗替仕様試験桁は動力工具での素地調整で適用可能な擬合金溶射を、新設仕様試験桁はJIS溶射を施工している。表-3に試験桁の施工年表を示す。

擬合金溶射試験桁について、仕様Aの上フランジ下面については10年目調査時に全面的な腐食

が確認されたため、素地調整程度2種、有機ジンクリッチペイント(1回)、エポキシ樹脂塗料(2回)による補修を実施している。仕様A、B、C、C'の上フランジ上面の旧暴露試験部との境界部では16年目調査時に、素地調整程度2種、さび面補修塗料(1回)、超厚膜形エポキシ樹脂塗料(1回)で補修を実施している。

JIS溶射試験桁について、仕様Hの上フランジ上面は8年目調査段階で腐食が顕著なことから暴露試験を終了し、補修溶射試験に転用している。

表-3 試験桁施工年表

年度	試験	擬合金溶射試験桁			JIS溶射試験桁		
		施工内容	防錆仕様	素地調整	施工内容	防錆仕様	素地調整
1991	別の暴露試験に利用	試験桁製作・暴露開始	さび止め塗料1回(35 μ m)	不明	試験桁製作・暴露開始	塗装(新設仕様)	不明
1992		補修塗装実施	塗装(塗替仕様)	不明			
~							
2002	本試験に転用調査継続中	擬合金溶射塗替え	ZnAl擬合金溶射	2種、1種	JIS金属溶射塗替え	Zn,Al,ZnAl,C-4	1種
~							
2010					上フランジZn溶射部補修	AlMg,Al,ZnAl,ZnAl擬合金	1種
~							
2023		21年目調査			21年目調査		
2024	調査継続中			調査継続中			

4. 外観観察

仕様毎の経年変化調査を目的とし、外観観察を行った。試験桁の外観観察箇所は、試験桁外面部の上フランジ上面、上フランジ下面および腹板面を対象とした。仕様ごとの外観状態を以下に示す。

4. 1 擬合金溶射試験桁

擬合金溶射試験桁の21年目調査時外観を図-7に示す。

4. 1. 1 仕様A(亜鉛・アルミニウム擬合金、封孔処理仕様)

仕様Aの10年目から21年目までの調査写真を図-8に示す。上フランジ下面については全面的な腐食が確認されたため10年目調査時に補

修を実施しており、上フランジ上面の旧暴露試験面との境界部においても15年調査時に補修を実施している。

上フランジ上面は白さびが発生しており、21年目の段階では部材端部からは赤さびが進展していることから防食性能は低下している。

上フランジ下面は10年目調査時に補修を行っているものの、補修後も15年目、21年目と補修部からのさびが進展し続けている。また、腹板面は桁端部の板コバからのもらいさびが確認され、21年目ではもらいさびの範囲が拡大している。上フランジ上面と比較した場合、白さび発生量は少なく、防食性能は維持できている。



図-7 擬合金溶射試験桁 21 年目外観

10 年目



15 年目



21 年目



(a) 上フランジ上面外観

10 年目



15 年目



21 年目



(b) 上フランジ下面、腹板面外観

図-8 仕様 A 21 年目調査

4. 1. 2 仕様 B (亜鉛・アルミニウム擬合金、塗装仕様)

仕様 B の 10 年目から 21 年目までの調査写真を図-10 に示す。上フランジ上面の旧暴露試験面との境界部については防食機能を喪失したと判断し、16 年目に補修を行っている。

上フランジ上面は 10 年目に 1~3 mm の膨れが約 20 箇所確認され、21 年目には割れが発生しさびも確認された(図-9 参照)。上フランジ下面は全体的に健全な状態であるものの、21 年目には溶接部からの塗膜割れが確認された。腹板面は全体的に健全な状態を維持できている。

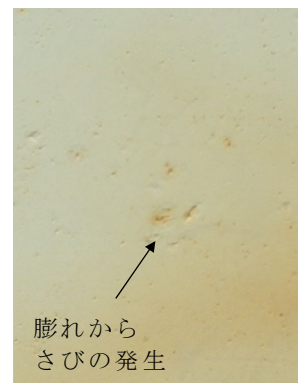
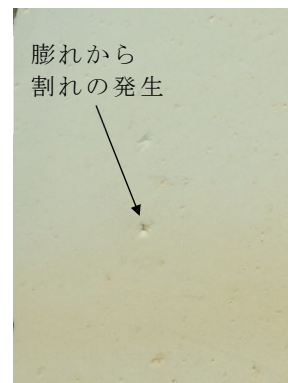


図-9 仕様 B 上フランジ上面の膨れ



(a)上フランジ上面外観
15年目
(b)上フランジ下面、腹板面外観
21年目
図-10 仕様B 21年目調査

4. 1. 3 仕様C(亜鉛・アルミニウム擬合金、塗装仕様、素地調整1種)

仕様Cの10年目から21年目までの調査写真を図-13に示す。上フランジ上面の旧暴露試験面との境界部については防食機能を喪失したと判断し、16年目に補修を行っている。

上フランジ上面は旧暴露試験面との境界部からのもらいさびが広範囲にあるものの、全体的には健全な状態である。21年目には部分的に3mm程度の大きさを塗膜の膨れが確認された(図-11参照)。

上フランジ下面是全体的に健全な状態であるものの、15年目に仕様Bとの境界部付近で塗膜の膨れが確認され、21年目にははがれ(90×130mm)、さびが確認された。

腹板面は全体的に健全な状態を維持できている。

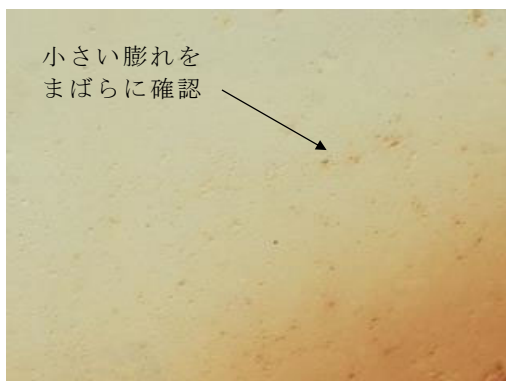


図-11 仕様C 上フランジ上面の膨れ

4. 1. 4 仕様C'(亜鉛・アルミニウム擬合金、塗装仕様、素地調整1種、粗面化处理なし)

仕様C'の10年目から21年目までの調査写真を図-14に示す。上フランジ上面の旧暴露試験面との境界部については防食機能を喪失したと判断し、16年目に補修を行っている。

上フランジ上面は境界部からのもらいさびが広範囲に確認できる。10年目に確認された30mm程度の塗膜の膨れが15年目には割れやはがれに進展した。この他にも全面にわたり割れや膨れ、はがれが多く確認され、21年目には更に進展した(図-12参照)。

上フランジ下面是全体的に健全な状態も、溶接部からの塗膜割れが確認された。

腹板面は全体的に健全な状態を維持できている。

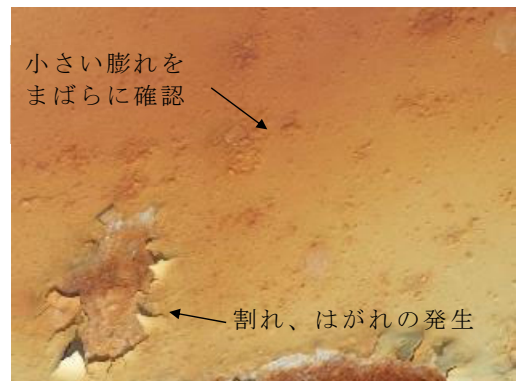


図-12 仕様C' 上フランジ上面の膨れ

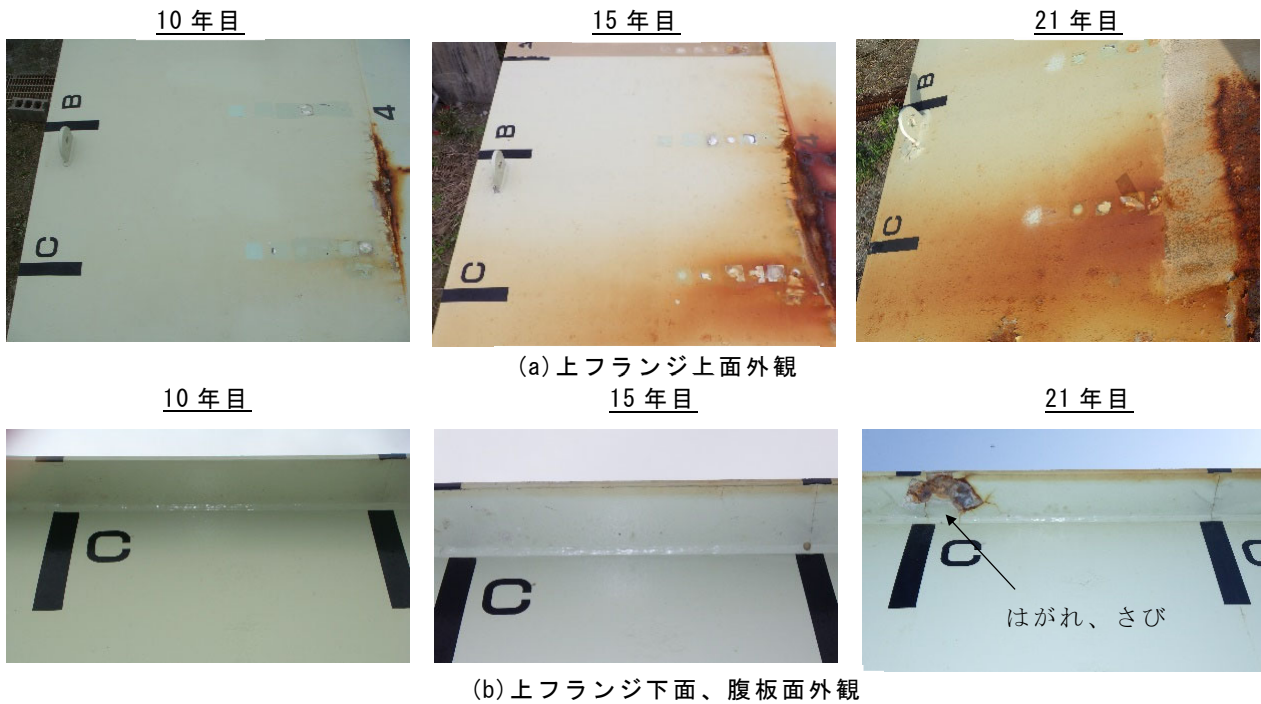


図-13 仕様C 21年目調査

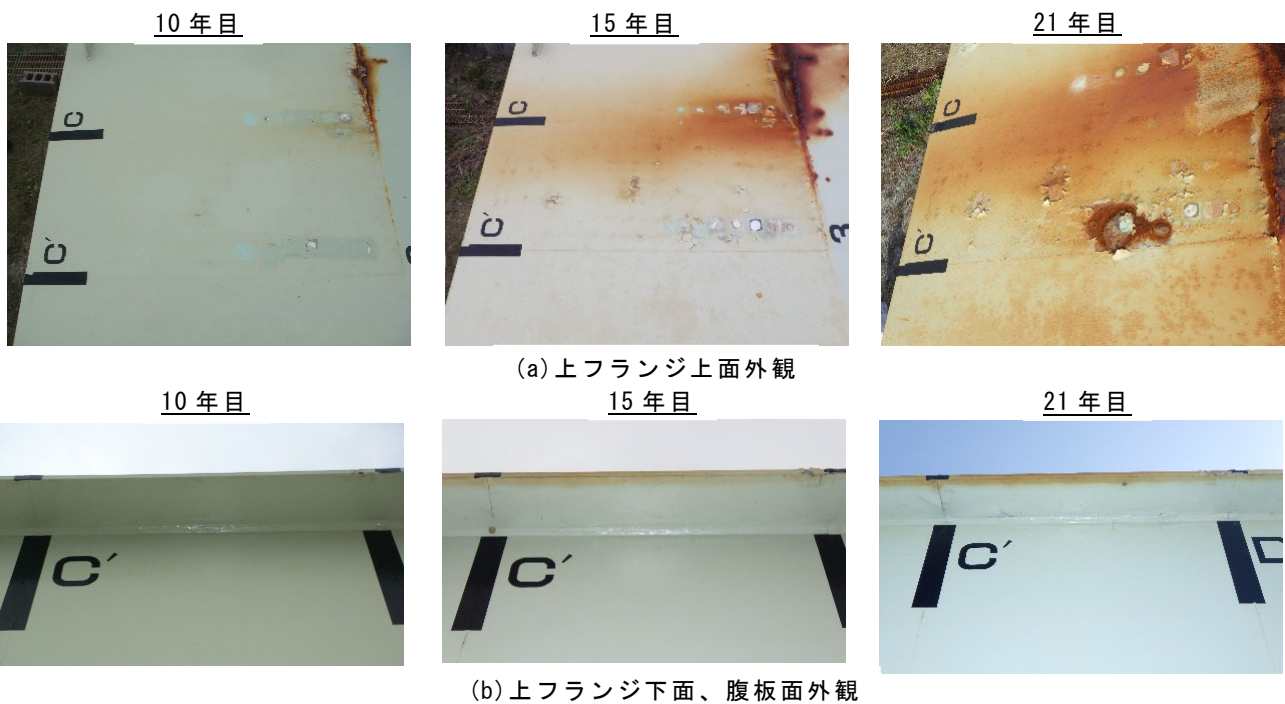


図-14 仕様C' 21年目調査

4. 1. 5 仕様D(亜鉛・アルミニウム擬合金、塗装仕様、ミストコート、素地調整1種、粗面化処理なし)

仕様Dの10年目から21年目までの調査写真を図-15に示す。

上フランジ上面は全体的に極薄い赤さび色

となっており、塗膜表面にしわのような膨れがみられる(図-16参照)。

上フランジ下面および腹板面は、健全な状態が維持されている。



(a) 上フランジ上面外観



(b) 上フランジ下面、腹板面外観

図-15 仕様 D 21 年目調査

を 図-18 に示す。



図-16 仕様 D 上フランジ上面の膨れ

上フランジ上面は 3 年目から白さびが顕著となり、7 年目の調査でさびの発生・促進が確認された。沖縄地区のような厳しい腐食環境では亜鉛溶射の早期劣化は想定されており、上フランジ上面についてはすでに限界に達したと判断し、暴露試験を終了して 8 年目に補修溶射を実施した。

上フランジ下面は、白さびが確認されており、その後も進展し部分的には亜鉛皮膜が消耗しつつある。

腹板面も同様に白さびが確認されているが、上フランジ下面ほど顕著な劣化は見られなかった。

4. 2 JIS 溶射試験桁

JIS 溶射試験桁の 21 年目調査時外観を 図-17 に示す。

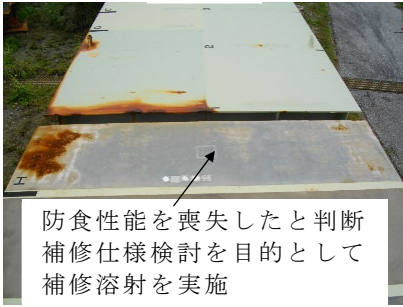
4. 2. 1 仕様 H(亜鉛溶射、封孔処理仕様)

仕様 H の 10 年目から 21 年目までの調査写真



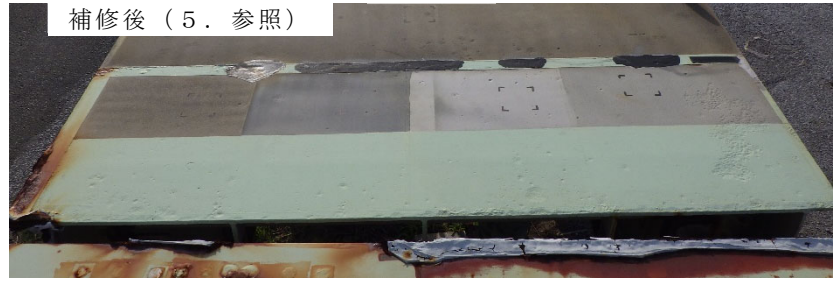
図-17 JIS 溶射試験桁 21 年目外観

8年目



防食性能を喪失したと判断
補修仕様検討を目的として
補修溶射を実施

21年目



(a) 上フランジ上面外観

10年目



15年目



21年目



(b) 上フランジ下面、腹板面外観

図-18 仕様H 21年目調査

10年目



15年目



21年目

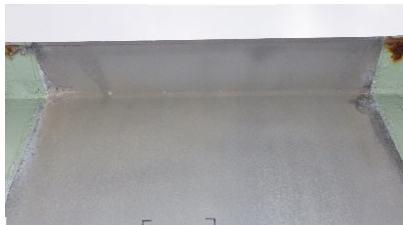


(a) 上フランジ上面外観

10年目



15年目



21年目



(b) 上フランジ下面、腹板面外観

図-19 仕様I 21年目調査

4. 2. 2 仕様I(アルミニウム溶射、封孔処理仕様)

仕様Iの10年目から21年目までの調査写真を図-19に示す。

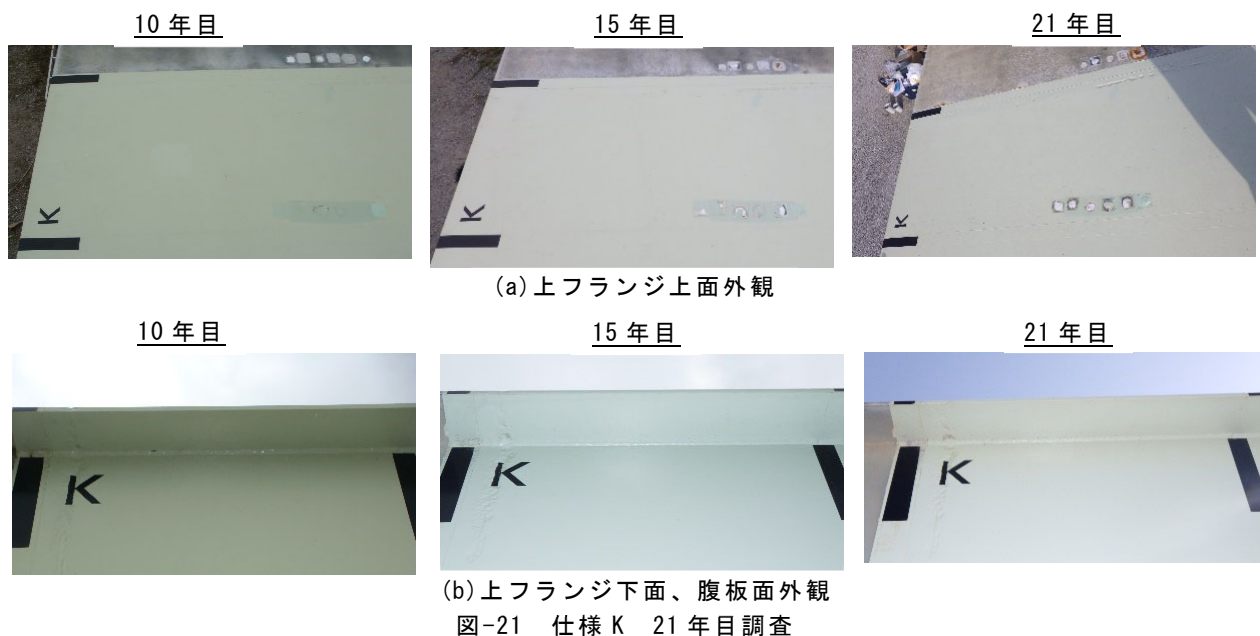
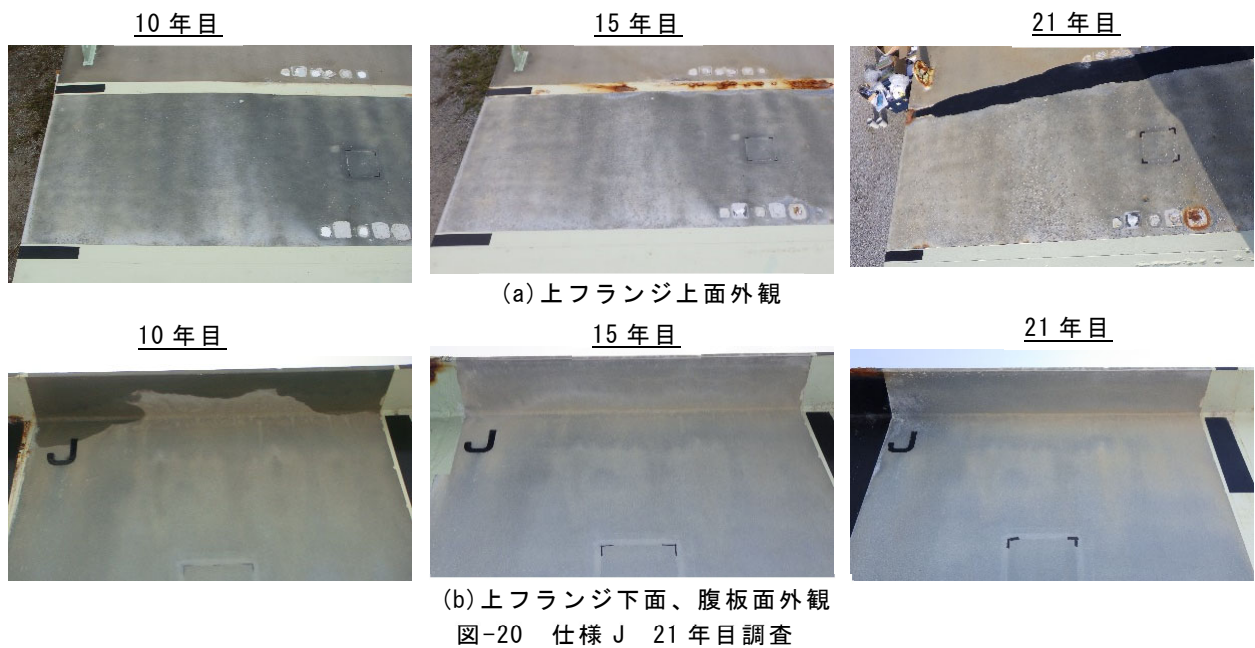
上フランジ上面は、顕著な劣化は確認されていないが、部分的にもらいさびが確認されている。

上フランジ下面および腹板面は、局所的な白さびは確認されるが、防食性能は維持できている。

4. 2. 3 仕様J(亜鉛・アルミニウム溶射、封孔処理仕様)

仕様Jの10年目から21年目までの調査写真を図-20に示す。

上フランジ上面と下面および腹板面は、仕様Iと比較して同程度のもらいさびと、やや広範囲に白さびが確認されているが、防食性能は維持されている。



4. 2. 4 仕様 K(亜鉛・アルミニウム溶射、塗装仕様)

仕様 K の 10 年目から 21 年目までの調査写真を図-21 に示す。

上フランジ上面と下面および腹板面は、健全な状態が維持されている。

4. 2. 5 仕様 L(C-4 塗装仕様)

仕様 L の 10 年目から 21 年目までの調査写真を図-22 に示す。

上フランジ下面は、15 年目にさびが確認され、21 年目にはさらに大きく (60×40 mm) になっている。

上フランジ上面と腹板面は、全体的に健全な状態が維持されている。

4. 3 外観観察まとめ

外観観察のまとめを以下に示す。本試験では JIS 溶射試験桁と比較して擬合金溶射試験桁の劣化が多いように見られるが、擬合金溶射試験桁はほぼ全面を意図的に発せいさせた履歴がある腐食の著しい試験体を使用している。このため、素地調整で除去できなかった孔食中の塩分が損傷度に影響している可能性がある。よって、ここでは擬合金溶射と JIS 溶射の防せい性



図-22 仕様L 21年目調査

能については比較を行っていない。

(1) 擬合金溶射試験桁について

- 1) 仕様Aの亜鉛・アルミニウム擬合金+封孔処理仕上げは、10年目にさびにより上フランジ下面を補修しているが、素地調整程度2種では試験体に付着堆積した塩分を除去できなかったことが影響していると思われる。このことから、沖縄のような塩害環境では素地調整程度1種の施工が必須と考える。
- 2) 仕様B、C、C'、Dの亜鉛・アルミニウム擬合金+塗装仕上げの仕様は部分的な劣化が確認された。どの仕様においても劣化は上フランジ上面に集中している。本試験の条件下では、平面部で塩分が付着しやすく直射日光の影響もある上フランジ上面は腐食環境が厳しいものと考えられる。上フランジ下面や腹板面は局所的な損傷を除き健全な状態であり、防せい能力を維持できていると考えられる。
- 3) 仕様C、C'の粗面形成材の有無による比較では、粗面形成材のないC'が全体的な損傷が多い傾向である。粗面形成材により適切な粗さが形成され、溶射皮膜の付着力が向上したことおよび粗面形成材自体の環境遮断効果が働いている可能性が考えられる。
- 4) 仕様B、Cの素地調整程度(1種、2種)の比較では、損傷度に顕著な差は確認できなかったが、上フランジ上面の膨れの大きさは仕様Bの方が大きく、素地調整程度2種で除去し

きれなかった残存さびからの劣化が進展している可能性が考えられる。

- 5) 仕様Dは専用の封孔処理材に代えて変性エポキシ樹脂によるミストコートを施したが、上フランジ上面の塗膜表面にしわのような膨れがみられた。現状は健全なようにも見えるが、塗膜下は白さび化が進んでいる可能性が考えられる。

(2) JIS溶射試験桁について

- 1) 仕様Hの亜鉛溶射は、上フランジ上面を8年目に補修していることや、上フランジ下面や腹板面でも白さびの発生が顕著なことから、沖縄地区のような塩害環境での使用は適していないと考えられる。
- 2) 仕様Iのアルミニウム溶射は、部分的な白さびの発生は確認されるが、健全な状態が維持されている。
- 3) 仕様Jの亜鉛・アルミニウム合金溶射は、白さびが増えているが、健全な状態が維持されている。
- 4) 仕様Kの亜鉛・アルミニウム合金溶射+塗装仕上げは、健全な状態が維持されている。
- 5) 仕様Lの重防食塗装(C-4塗装系)は、全体的に健全な状態が維持されている。局所的な劣化箇所は拡大しており、劣化進展速度は溶射仕様より速いことが確認できる。

5. 亜鉛溶射部の補修について

4. 2. 1に示す JIS 溶射試験桁の H 仕様（亜鉛溶射、封孔処理仕様）の上フランジ上面における補修仕様を表-4に示す。補修範囲は、亜鉛溶射部の上フランジ上面の全面補修とした。補修仕様は、アルミニウム・マグネシウム合金、アルミニウム、亜鉛・アルミニウム合金、亜鉛・アルミニウム擬合金の4種類の金属溶射とし、それぞれの封孔処理まで（①、②、③、④）と、塗装仕上げまで（①'、②'、③'、④'）の8種類の仕様とした。補修箇所の13年目調査の外観に塗分けを追記した写真を図-23に示す。さらに、各仕様の封孔処理仕様における拡大写真を図-24に示す。

外観観察結果から以下の内容が確認された。

- (1) 塗装仕上げを施した仕様を含め、8種類のいずれの補修仕様も顕著な防食機能の低下はなく、健全な状態が維持されている。
- (2) 金属溶射+封孔処理仕様は、亜鉛・アルミニウム合金溶射と亜鉛・アルミニウム擬合金溶射で亜鉛の溶出による白さびが確認されており、塩水への消耗溶解性に優れたアルミニウム系溶射（アルミニウム溶射、アルミニウム・マグネシウム合金溶射）の優位性が確認できた。
- (3) 金属溶射+塗装仕上げは、いずれの仕様も変状は確認されておらず、腐食環境の厳しい場所では、溶射の種類に関わらず金属溶射+塗装仕上げの有効性が確認された。

表-4 補修仕様

工程		補修仕様			
		仕様 ① (①')	仕様 ② (②')	仕様 ③ (③')	仕様 ④ (④')
		アルミニウム・マグネシウム合金溶射	アルミニウム溶射	亜鉛・アルミニウム合金溶射	亜鉛・アルミニウム擬合金溶射
素地調整	処理目的	1次ブラスト さびおよび旧皮膜の剥離除去 2次ブラスト 清浄化および粗面化処理			
	研削材	1次 フェロニッケルスラグ 粒度 G1 1.7~0.3 mm 2次 熔融アルミナ 粒度 #60, #24			
	除せいで度	ISO 8501-1 Sa 3		ISO 8501-1 Sa 2 1/2	
粗面化処理		ブラスト処理による			粗面形成材による
金属溶射	材料	AlMg5	Al99.5	ZnAl15	Zn-Al 擬合金
	皮膜厚さ	150 μm 以上	150 μm 以上	100 μm 以上	100 μm 以上
封孔処理		専用封孔処理剤	専用封孔処理剤	専用封孔処理剤	専用封孔処理剤
中塗		ふっ素樹脂塗料用中塗 (140g/m ²) 30 μm			
上塗		ふっ素樹脂塗料上塗 (120g/m ²) 25 μm			

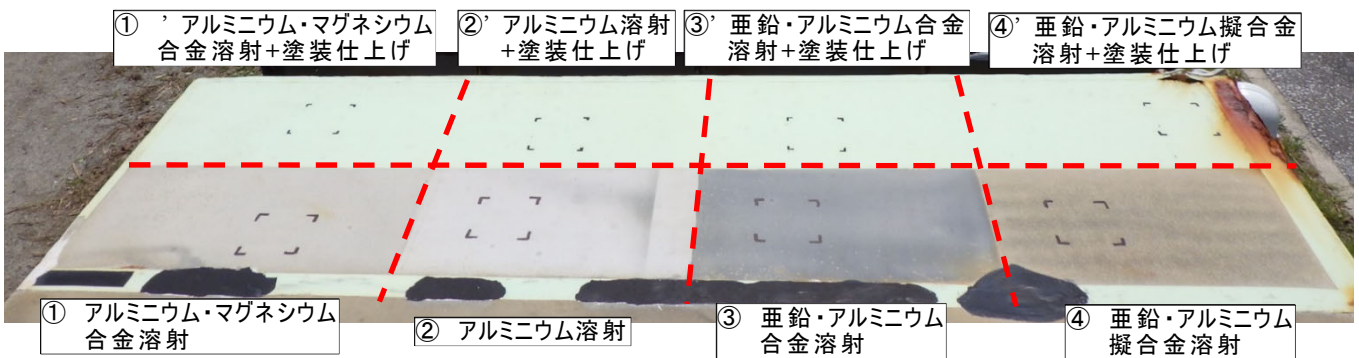


図-23 補修仕様13年目外観

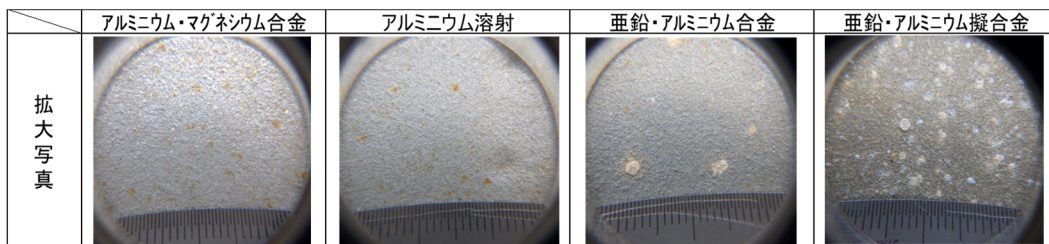


図-24 拡大写真

6. まとめ

腐食環境の厳しい沖縄地区における大型試験桁を用いた金属溶射の耐久性調査に関して、21年の暴露試験の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本試験での溶射金属の違いによる比較では、十分な耐久性を保持しているアルミニウム溶射と亜鉛・アルミニウム合金溶射が最も優位であり、亜鉛溶射は適していない。
- (2) 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射については亜鉛・アルミニウム合金溶射と同等程度の耐久性が想定されるが、本試験では擬合金溶射試験桁は試験前の腐食履歴からより厳しい条件であったため、JIS 溶射試験桁との防せい性能の比較は困難であった。
- (3) 亜鉛・アルミニウム合金溶射、亜鉛・アルミニウム擬合金溶射ともに、金属溶射+封孔処理仕上げより金属溶射+塗装仕上げの方がより健全な状態を維持している。沖縄地区のような厳しい腐食環境での耐久性確保には、塗装仕上げが有効である。
- (4) 金属溶射+塗装仕上げと塗装(C-4 塗装系)の比較では塗装仕様の局所的な劣化箇所の拡大が速く、金属溶射+塗装仕上げが優位であると思われる。
- (5) 塩害環境で劣化した鋼橋の補修を行う場合の素地調整は、素地調整程度1種での施工が必須と考える。特に孔食中のさびや塩分の除去が重要である。

本暴露試験は当初10年を目途に実施してきたが、多くの仕様で顕著な変化がなかったことから試験を継続してきた。その後、新型コロナウイルス感染症の影響で詳細調査を実施できない期間もあったが、今回21年目の調査報告が実施できた。しかし、21年経過しても、変化が確認できない仕様もあることから、現在も試験を継続しており、金属溶射の耐久性データの蓄積と補修方法の確立に繋げていきたい。

なお、本暴露試験では近年採用が増えているアルミニウム・マグネシウム合金溶射は一部の補修のみに採用している。これは、暴露試験開始当時の鋼橋においては、亜鉛とアルミニウム

による溶射が主流で、アルミニウム・マグネシウム合金溶射の採用は考えていなかったためであり、暴露8年目から補修溶射として追加した。日本溶射工業会防食委員会が実施した複合サイクル試験結果では、亜鉛・アルミニウム合金溶射の推定耐久年数が約60年であるのに対し、アルミニウム・マグネシウム合金溶射の推定耐用年数は約100年であり、アルミニウム・マグネシウム合金溶射は耐久性に優れることが示されている。

現在、アルミニウム・マグネシウム合金溶射の耐久性を検証するため、補修溶射の暴露試験を実施しているほか、試験桁と同じ仕様の試験板を暴露しており、暴露試験終了時に評価する予定である。

さらに、今後はアルミニウム・マグネシウム合金溶射の耐久性データの蓄積のため、暴露試験板を追加設置する予定である。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、御協力頂きました国立研究開発法人土木研究所、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。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧
(平成17年12月)