

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04581

研究課題名(和文) 溶射が施された鋼材の腐食メカニズムの解明と補修技術の開発

研究課題名(英文) Elucidation of corrosion mechanisms and development of repair techniques for thermal-sprayed steel

研究代表者

麻生 稔彦 (Aso, Toshihiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：30231921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：厳しい腐食環境にさらされ塩分がたまりやすい箇所では、アルミニウム溶射でも腐食が発生する。膜厚計測の結果から、健全部でも桁位置による差は確認され、損傷部においては健全部より溶射皮膜が薄いことが確認できたが、いずれも目標膜厚160 $\mu\text{m}$ を下回る箇所は確認できなかった。また、表面形状はアーク溶射が封孔処理を施した場合においても高い粗度を確認できた。このことより、ガスフレイム溶射に比べてアーク溶射は塩分が付着しやすい表面形状であることが推察される。腐食したアルミニウム溶射鋼材の補修にあたっては、十分な素地調整を実施した後に、アルミニウム-マグネシウム溶射を施すことで防食性能の回復が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間を通じて、(1)実橋梁における腐食調査および腐食環境調査、(2)促進試験による溶射鋼材の腐食進展状況の観察、(3)腐食した溶射鋼材の促進試験による補修効果の検討を実施した。本研究は、溶射橋梁の長寿命化を実現するための研究であり、溶射後の腐食過程の解明と補修方法の検討に主眼をおいた。この結果、腐食したアルミニウム溶射鋼材の補修にあたっては、十分な素地調整を実施した後に、アルミニウム-マグネシウム溶射を施すことで防食性能の回復が期待できる。本研究の成果は単に橋梁にとどまらず、防食方法として溶射が施された鋼構造物への応用が可能であろう。

研究成果の概要(英文)：Corrosion occurs even in the sprayed aluminum coating in areas exposed to a severe corrosive environment where salt tends to accumulate. The results of thickness measurements showed that there were differences depending on the position of the girders even in the healthy areas, and that the sprayed coating was thinner in the damaged areas than in the healthy areas, but there were no areas where the target film thickness was less than 160  $\mu\text{m}$ . The surface profiles showed a high degree of roughness even when arc spraying was applied to seal the holes. This suggests that the surface profile of the arc sprayed steel is more susceptible to salt adhesion than that of the gas flame sprayed steel. When repairing corroded aluminum sprayed steel, it is expected that corrosion protection performance will be restored by applying aluminum-magnesium spraying after sufficient preparation of the surface.

研究分野：鋼構造

キーワード：腐食 溶射 補修 アルミニウム溶射

## 1. 研究開始当初の背景

鋼橋を代表とする鋼構造物は、その耐久性を維持するために何らかの防食を施す必要がある。従来は塗装による防食がほとんどであったが、近年になり、塗装を必要としない耐候性鋼材の使用も進んでいる。申請者はこれまでに耐候性鋼材に関する研究を実施しており、耐候性鋼材の適用環境と腐食原因、耐候性鋼材に発生するさびの評価方法を明らかにしており、さらに腐食が進行した耐候性鋼材の補修方法についても研究を進めている。しかし、耐候性鋼材は適用可能な腐食環境に制限があり、より厳しい腐食環境にあつてはメッキあるいは溶射が使用されている。

このうち溶射は溶融またはそれに近い状態にした粒子（溶射材）を鋼板表面に吹き付けて皮膜を形成する表面処理法であり、我が国においては1963年に初めて施工されている。近年になり、長期耐久性の確保が可能と考えられ橋梁への適用例が増えている。防さびや防食に適用されている溶射方法には、ガス式のフレイム溶射と電気式アーク溶射が主体であったが、最近では電気式のプラズマ溶射も適用されるようになった。また、溶射材料としては、亜鉛（Zn）、アルミニウム（Al）およびそれらの合金などが主体であり、最近の電気式のプラズマ溶射では、アルミニウムとマグネシウム合金（Al-Mg）が主として使用されている。

しかし、高い耐久性を期待して溶射を施した橋梁において、架設後数年のうちに腐食が発生する事例があらわれている。これまでの研究は主として溶射皮膜の形成や溶射技術に関するものであり、溶射後の腐食の発生およびその補修方法は未だ未解明である。今後、鋼橋の長寿命化とライフサイクルコストの低減を目指して溶射の使用は増えるものと考えられる。このような状況にあつて、溶射鋼構造の腐食メカニズムの解明と効果的な補修方法の開発は急務であるとともに、社会的に重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、溶射が施された鋼橋の長寿命化の実現を目的とする。そのための要素研究として以下の事項を明らかにする。(1)溶射に腐食が発生した実橋梁における腐食調査と腐食環境調査、(2)溶射鋼材の腐食発生メカニズムの解明、(3)腐食が発生した溶射鋼材の補修方法の効果検証。

## 3. 研究の方法

### (1) 実橋梁における腐食調査および腐食環境調査

海岸に近い溶射橋梁において腐食が発生している橋梁について、腐食の位置と程度および溶射厚さを調査するとともに、付着塩分量を測定し、現況を明らかにする。さらに当該橋梁において飛来塩分量、温湿度、付着塩分量を1年間にわたり継続観測する。

### (2) 溶射鋼材における腐食発生メカニズムの解明

アーク溶射とガスフレイム溶射の表面性状の観察および促進試験により付着した塩分を測定することで、溶射工法による塩分付着特性を検討する。また、素地調整程度、溶射厚、封孔処理の有無、施工距離をパラメーターとした試験片を製作し、腐食促進試験（複合サイクル試験）を実施する。

### (3) 溶射鋼材の補修効果の検討

溶射部に損傷を発生させた試験片に対して各種の補修を施し、複合サイクル試験を実施した。試験片にはAl溶射、Al-Mg溶射、Re-I塗装、Re-II塗装を施す。また、素地調整法の違いによる効果も併せて検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 実橋梁における腐食調査および腐食環境調査

対象橋梁は、2005年に瀬戸内海海岸の河口部に建設された橋長514m、幅員13.85mからなる9径間連続非合成2主桁桁橋である。対象橋梁にはアルミニウム溶射皮膜（目標膜厚は160 $\mu$ m）の上に珪素系化合物を主成分とする無機系樹脂塗料にて封孔処理されている。

実橋梁調査により得られた主な成果は次の通りである。

【腐食状況】膜厚計測は計測位置により差があり、損傷部においては健全部より溶射皮膜が薄いことが確認できたが、いずれも目標膜厚160 $\mu$ mを下回る箇所は確認できなかった。腐食状況は全体的にはほぼ健全であるが、主に桁の内側において部分的に溶射皮膜の酸化による白さびが認められ、また、溶射皮膜が消耗し赤さびが発生している部位がある（図-1）。部材毎の腐食箇所数を図-2に示す。橋梁全体としては鋼道路橋塗装防食便覧によるレベルIの状態であるが、部分的にレベルIIからレベルIIIへ移行しつつある部位も認められる。部位別には①首溶接部：下フランジ桁内側にほぼ全線にわたって発生、②ウェブ：赤さびと白さびが発生、白さびはもろいウエハース状になっている箇所あり、③上フランジ：やや広がりを持った赤さびが発生、④下フランジ：上フランジと同様であり、コバ部はエレピークシオンピース切断跡からも一部発錆となっている。

【腐食環境】[1]飛来塩分量の計測結果から、1年を通して対象橋梁は厳しい腐食環境下に曝されており、特に夏季に比べ冬季で飛来塩分量が多くなることがわかった。[2]表-1に示す付着

塩分量の計測結果から、G1桁、G2桁の下フランジ上面および横桁の上下フランジ上面において付着塩分量は1999mg/m<sup>2</sup>を示し、計測可能領域を超える付着塩分量を計測した。このことから、腐食が発生するための相当量の付着塩分が堆積していることが確認できた。[3]温湿度の計測結果から、平均温度は市の観測データと明確な差は確認できなかった。しかし、平均湿度は市の観測データより高い傾向にあり、平均湿度は約70%を示す。



(a) 白さび (b) 局所的な腐食(青)と広がりを持った腐食(赤)

図-1 腐食状況

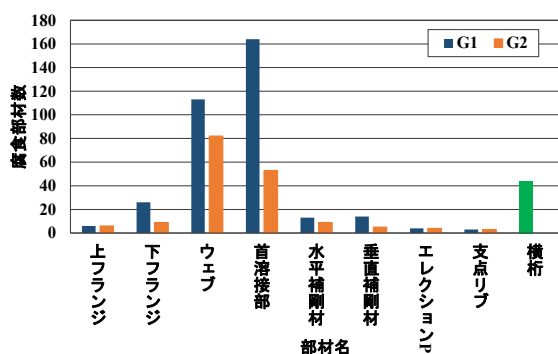


図-2 腐食発生個所数

表-1 付着塩分量

測定箇所	平均(mdd)
G1下フランジ下 (a)	0.21
G1下フランジ下 (b)	0.32
G1下フランジ上 (c)	0.24
G1支点上補剛材 (d)	0.23
G2下フランジ上 (e)	0.14

## (2) 溶射鋼材における腐食発生メカニズムの解明

対象橋梁は溶射工法としてアーク溶射を用いており、アーク溶射はガスフレーム溶射との表面性状の違いにより、腐食原因と想定される塩分をより多く付着させる機構となり腐食が進行しやすい可能性が考えられる。そのため、アーク溶射とガスフレーム溶射の表面性状を観察および、促進試験により付着した塩分を測定することで、溶射工法による塩分付着特性を検討する。試験片は150×3.2×75mmのSS400とし、表面にアーク溶射またはガスフレーム溶射によりアルミニウム溶射(目標膜厚160μm)を施す。表面性状の観察結果を表-2に示す。表-2においてSzは最大高さ(Rzの値を面に拡張したもの)を示し、Saは算術平均高さ(Raの値を面に拡張したもの)を示す。この検討により、以下が明らかとなった。

表-2 表面観察

	溶射工法	封孔処理	Sq(μm)	Ssk	Sku	Sp(μm)	Sv(μm)	Sz(μm)	Sa(μm)	Sdq	Sdr(%)
1	アーク溶射	なし	29	0.7	3.4	128	92	219	23	9.0	353.1
2			29	0.5	3.4	108	119	227	23	8.6	330.1
3		あり (Hiクリヤー)	31	0.8	3.5	119	104	223	24	10.6	359.3
4			27	0.8	4.3	169	107	276	20	10.7	352.4
5	ガスフレーム溶射	なし	25	0.3	2.9	99	71	170	20	9.2	390.0
6			30	0.2	2.7	98	87	185	24	9.4	395.4
7		あり (Hiクリヤー)	15	0.7	3.5	88	76	163	12	5.3	205.3
8			19	0.3	0.3	72	72	144	15	5.1	212.1

1) 表面形状は外観目視および触覚からもアーク溶射が粗い形状を示す。

- 2) 最大高さ (Sz) において、アーク溶射が全て 200 μm 以上を示すのに対し、ガスフレーム溶射は全て 200 μm を下回る。
- 3) 最大高さ (Sz) の傾向は、封孔処理の有無による影響は確認できない。
- 4) 算術平均高さ (Sa) については、アーク (封孔なし・あり) およびガスフレーム (封孔なし) は 20 μm 以上の値を示したが、ガスフレーム (封孔あり) のみ 20 μm を下回る。
- 5) 表面形状はアーク溶射が封孔処理を施した場合においても高い粗度を確認できた。このことより、ガスフレーム溶射に比べてアーク溶射は塩分が付着しやすい表面形状であることが推察される。
- 6) 複合サイクル試験 (10 日間, 30 サイクル) 実施後の付着塩分量と電気伝導率を示す。全ての試験片において付着塩分量は計測器の測定限界である 1999mg/cm<sup>2</sup> である。一方、電気伝導率はガスフレーム溶射の方が低い傾向にある。

素地調整程度、溶射厚、封孔処理の有無、施工距離をパラメーターとした試験片を製作し、腐食促進試験 (複合サイクル試験) を実施した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 素地調整 Sa3 の試験片は全体的にやや密着力が低下したが、これは表面の白さび部分にて溶射皮膜の破断が起きたと想定される。
- 2) 付着塩分量はさびの進展により凹凸が増えることで増加することもあり得るが、溶射被膜が残っている試験片では特に差は見られない。
- 3) イオン透過抵抗値について、さびが大きく進展している試験片は耐候性鋼材と同様な傾向がみられたが、溶射被膜が残存した試験片では大きな変化は見られない。

### (3) 溶射鋼材の補修効果の検討

表-3 に示す補修を施した腐食試験片の複合サイクル試験により、各種補修方法の耐久性を検討した。促進試験に使用する鋼材は 150×90mm であり、あらかじめアルミニウム溶射を施したのちに促進試験により腐食を生じさせている。促進試験の結果を以下に示す。

表-3 補修条件

試験片番号	溶射材料	溶射方法	素地調整	素地調整方法	封孔処理	目標膜厚	複合サイクル試験
1-1	Al・Mg溶射	ガスフレーム	1種ケレン	レーザー+ブリストルブラスター	Hi クリヤー	100	114日 (342サイクル)
1-2				ブリストルブラスター+レーザー			
1-3				ハキームブラスト			
1-4							
1-5				レーザー			
1-6							
1-7	Al溶射			レーザー+ブリストルブラスター			
1-8		ブリストルブラスター+レーザー					
1-9	Al・Mg溶射	アーク		レーザー+ブリストルブラスター			
1-10				ブリストルブラスター+レーザー			
1-11				ハキームブラスト			
1-12							
1-13				レーザー			
1-14							
1-15	Al溶射		レーザー+ブリストルブラスター	160			
1-16		ブリストルブラスター+レーザー					
1-17	Rc-1		レーザー+ブリストルブラスター	5層塗	250		
1-18			ブリストルブラスター+レーザー				
1-19	Rc-2	ハケ	2種ケレン	動力工具	2回塗	80	
1-20							
1-21	常温めっき					—	50日 (150サイクル)
1-22							
1-23	防食テープ	テープ				—	114日 (342サイクル)
1-24							

- 1) 金属溶射試験片については補修部の下部 (塩分が付着し、常に堆積する箇所) より腐食が進行。特にブリストルブラスターを用いた素地調整試験片について損傷が顕著である。
- 2) 初期膜厚を溶射の一般的な膜厚である 100 μm 以上に設定したが、厳しい腐食環境の補修仕様においては膜厚が不足しており損傷が発生したことが想定される。
- 3) 塗装試験片については局部的に大きな損傷はない状態だが、塗膜表面全体に若干の膨れ等

がみられ、全体の耐久性は低下しているものと考えられる。

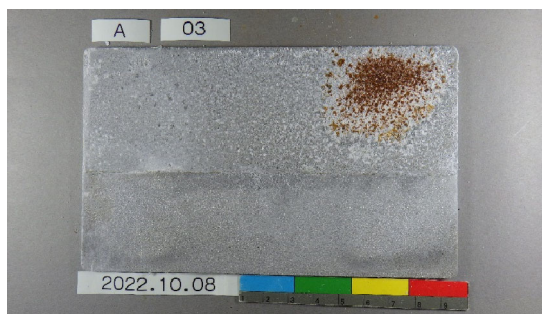
- 4) 一次防錆（常温めっき）試験片については試験開始直後から損傷がみられ全面に腐食が進行したため、50日間で試験中止した。

上記の結果について、さらに検討をすすめるために、アーク溶射によるアルミニウム溶射（Al溶射）、ガスフレーム溶射によるアルミニウム-マグネシウム溶射（Al-Mg溶射）と亜鉛-アルミニウム溶射で補修した試験片について30日間（90サイクル）の促進試験を実施した。試験後の状況を図-3に示す。

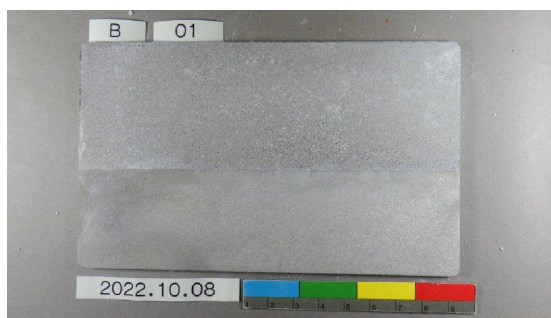
- 1) 損傷の傾向に顕著な違いは見られない。
- 2) 事前にきずを入れていた部分に対し、Al溶射試験片の方が損傷の広がり大きい。既往の研究結果通り、AlMg溶射の方がきずに対する電気化学的防蝕効果に優れた性能を発揮するものと考えられる。
- 3) 重ね合わせ部分を起因とする損傷は発生していない。当初想定通り、Al溶射にAlMg溶射を重ね合わせても影響はないものと考えられる。
- 4) ガスフレーム溶射とアーク溶射の比較では本実験では顕著な差は現状見られていない。

#### (4) まとめ

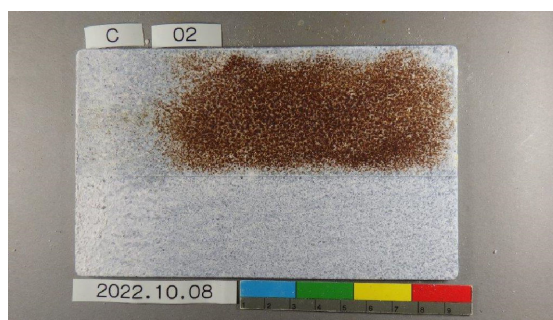
外観調査の結果から、厳しい環境にさらされ構造上塩分がたまりやすい箇所では、耐久性に優れたアルミニウム溶射でも腐食が発生することが確認できた。膜厚計測の結果から、健全部でも桁位置による差は確認され、損傷部においては健全部より溶射皮膜が薄いことが確認できたが、いずれも目標膜厚160 $\mu$ mを下回る箇所は確認できなかった。また、表面形状はアーク溶射が封孔処理を施した場合においても高い粗度を確認できた。このことより、ガスフレーム溶射に比べてアーク溶射は塩分が付着しやすい表面形状であることが推察される。腐食したアルミニウム溶射鋼材の補修にあたっては、十分な素地調整を実施した後に、アルミニウム-マグネシウム溶射を施すことで防食性能の回復が期待できる。



(a) アルミニウム溶射



(b) アルミニウム-マグネシウム溶射



(c) 亜鉛-アルミニウム溶射

図-3 腐食外観

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 HIROAKI KUWANA, KAZUO TAKAGI, RINA HASUIKE, TOSHIHIKO ASO	4. 巻 1
2. 論文標題 STUDY ON DETERIORATION OF THERMAL SPRAYED ALUMINUM COATING BY BRIDGE SURVEY	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of The Sixth Australasia and South-East Asia Structural Engineering and Construction Conference	6. 最初と最後の頁 STR-08
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 桑名 弘暁, 清水 征也, 高木 一生, 麻生 稔彦
2. 発表標題 複合サイクル試験によるアルミニウム溶射の劣化要因に関する検討
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------