

金属溶射の品質管理の効率化と適用範囲の拡大に関する研究

長崎大学大学院工学研究科

広野 邦彦

社会経済活動の基盤となるわが国のインフラは、その多くが高度経済成長期以降に整備されており、今後、老朽化する施設が加速度的に増加するとされている。2033年には、道路橋や河川管理施設、港湾岸壁などは、建設後から50年以上経過する割合が60%程度になると試算されている。

鋼構造物における代表的な劣化の一つに腐食が挙げられる。鋼材の腐食は、防せい皮膜の経年劣化等によって発生し、老朽化によって顕在化する。わが国における土木分野の腐食コストの変遷は、2015年度において新設費は523億円（全体の41%）、維持費は754億円（全体の59%）であり、老朽化が顕在化してきたことに起因する維持費の著しい増加が指摘されている。今後、老朽化の進む多くの社会インフラを維持していくためには、確実な管理を実施していく必要があり、超高齢化社会の到来による管理技術者の不足や、腐食コストの縮減などの観点から、鋼構造物においては長期耐食性の実現による長寿命化が求められるようになっている。

このような背景から、近年、鋼構造物の長寿命化を目的として、防食皮膜に金属溶射を適用する事例が多くなっている。本研究は、鋼構造物の長寿命化を効率的に実現することを目的とし、金属溶射（主にAl-5Mgプラズマアーク溶射）を用いた構造物の防食技術や、金属溶射を施工した構造物の維持管理における課題などを整理し、金属溶射の品質管理の効率化について検討した。また、金属溶射を海洋鋼構造物や鉄筋材料に適用するなど、金属溶射の適用範囲の拡大について検討した。本論文は、これらの研究成果を取りまとめたものであり、次に示す8章から構成されている。

第1章では、社会インフラの老朽化による問題や、鋼構造物に発生する腐食損傷事例を示し、本研究の背景について述べた。鋼構造物の長寿命化を実現する方法に金属溶射を取り上げ、効率的な施工や維持管理に関する課題や既往研究について整理し、本研究の目的を明確にした。

第2章は、筆者が過去に行った関連する基礎的な試験に関する章であり、金属溶射の概要、各種溶射皮膜の複合サイクル試験、鋼材腐食の試験、クロスカット施工方法の比較試験等の結果や、溶射皮膜を有する鋼材の疲労試験とき裂の検出に関する検討、およ

び鋼部材の連結部に金属溶射を適用した場合のすべり係数の向上などについて述べた。

第3章では、施工の効率化を目的として、ブラスト処理後から金属溶射の施工開始までの時間間隔を延長させる可能性について確認する実験について述べた。ブラスト処理後の鋼板に水溶性の防錆剤を適用して湿潤環境に暴露したのちに金属溶射を行い、鋼材表面のフラッシュさびの発生状況や、溶射皮膜の密着性および耐食性などを確認した。実験結果から、ブラスト処理後から48時間程度経過した場合でもAl-5Mg合金溶射皮膜の耐食性に重大な問題は発生しない可能性が示された。

第4章では、ブラスト処理後の鋼素地表面の粗さを効率的に管理する手法の確立を目的として、レーザー散乱光の原理を応用した広範囲の鋼素地調整面の表面粗さの測定方法に関する検討を行った。また、鋼素地表面粗さと溶射皮膜の密着強度の関係についても調査した。さらにシミュレーションにより、レーザー光径や測定距離など効果的な測定条件を求めた。

第5章では、プラズマアーク溶射を施工した箇所の近傍で車両火災や桁下火災などが発生した場合を想定し、Al-5Mg合金溶射皮膜の外観などから鋼材の受熱温度を推定するため、Al-5Mg合金溶射（無封孔や封孔処理）した試験片の加熱実験を行った。溶射皮膜や封孔剤の外観状況および鋼材と溶射皮膜の密着強度などと、鋼材受熱温度の関係について確認し、鋼材受熱温度は溶射皮膜の外観からある程度推定可能であることを明らかにした。

第6章では、金属溶射の適用範囲の拡大として、海洋鋼構造物において、海洋生物の付着防止と長期耐食性を備える被覆仕様を開発・提案することを目的に、銅（Cu）および銅-チタン合金（Cu-Ti）並びにAl-5Mg合金などを用いた金属溶射の単膜や、金属溶射を防食下地とし上塗りに防汚塗料を用いた被覆仕様、厚塗りの重防食塗装などを対象として苫小牧西港護岸において実施した暴露実験の結果を述べた。本実験では目標とする被覆仕様は得られなかったが、海洋暴露における皮膜消耗などの知見が得られた。

第7章では、コンクリート構造物の長寿命化を目的に、エポキシ樹脂系封孔処理を行ったAl-5Mg合金溶射を施した鉄筋材料（以下、Al-5Mg溶射鉄筋）の基礎実験として実施した、コンクリートとの付着強度、Al-5Mg溶射鉄筋を用いた梁試験体の力学的特性、高濃度塩分環境におけるAl-5Mg溶射鉄筋の耐食性およびコンクリート中における犠牲防食効果などに関する実験結果について述べた。Al-5Mg溶射鉄筋は普通鉄筋に比べてコンクリートとの付着強度が高く、高濃度塩分環境において優れた耐食性を有することが示された。また、硬化したコンクリート中でも犠牲防食効果があり、RC梁の力学的特性は普通鉄筋と変わらない結果であった。これらの結果から、Al-5Mg溶射鉄筋のコンクリート構造物への適用は十分に可能性があるかと結論付けた。

第8章では、本論文の全体を総括して研究成果のまとめを示した。また、今後の課題や展望などについて述べた。

A Study on Improving the Efficiency of Quality Control and Expanding the Application of Metal Spraying

Graduate School of Engineering, Nagasaki University
Kunihiko HIRONO

Most of Japanese infrastructure, which is the basis of socio-economic activities, has been developed since the period of high economic growth, and it is said that the number of aging facilities will increase at an accelerating rate in the future. It is estimated that about 60% of road bridges, river management facilities, harbor quays, etc. will be more than 50 years old after construction in 2033. Corrosion is one of the typical deteriorations in steel structures. Corrosion of steel materials originates from aging of the protective film, and becomes apparent after a certain period. Corrosion costs in the civil engineering field in Japan in FY2015 were 52.3 billion yen (41% of the total) for new construction and 75.4 billion yen (59% of the total) for maintenance. It is pointed out that there is a significant increase in the maintenance cost due to the increase of deteriorated structures.

In order to maintain the aging social infrastructures, it is necessary to carry out their appropriate management. From the viewpoint of the shortage of engineers due to the advent of a rapidly aging society and the reduction of corrosion costs, steel structures are required to extend their service life by the realization of long-term corrosion resistance.

In this context, the application of metal spraying to anticorrosion coatings has increased in recent years to extend the life of steel structures. In this study, aiming at extending the life of steel structures, issues of the anticorrosion technology for structures using metal spraying (mainly Al-5Mg plasma arc spraying) and the maintenance of the metal sprayed structures were clarified first. Then, the quality control methods related to metal spraying were examined. The expansion of metal spraying application, such as applying to marine steel structures and reinforcing bars in concrete structures was also examined. This dissertation summarizes these research results and consists of the following eight chapters.

Chapter 1 shows the problems caused by the aging of social infrastructure and the examples of corrosion damage that occurs in steel structures, and describes the background of the research. Metal spraying was selected as a method for extending the life of steel structures, and issues related to efficient construction and maintenance were summarized. The relevant previous studies by other researchers were reviewed. In addition, the purpose of this study was clarified.

Chapter 2 summarizes the outline of metal spraying and the basic tests that the author had conducted in the past, such as the results of combined cyclic corrosion tests of various thermal spray coatings, the fatigue test of steel materials with thermal spray coatings, the results of the study on crack detection, and the improvement of the slip coefficient when metal spraying is applied to the connecting part of the steel members.

In Chapter 3, an experiment to extend the time interval between blasting and spraying Al-5Mg alloy was conducted. An anticorrosive agent was applied to the steel material to suppress flash rust, and a combined cyclic corrosion test was performed on the test pieces that were sprayed 48 hours after blasting. The study suggested that the time interval could be extended to 48 hours.

In Chapter 4, as a method to manage the roughness on the area to be metal-sprayed, applicability of the speckle pattern of the laser scattered light to the roughness measurement was examined. Furthermore, in order to improve the measurement accuracy in the future, optimal measurement conditions (laser beam diameter, offset distance) of laser scattered light were obtained by the simulation. The relationship between the surface roughness and adhesion of the metal-sprayed layer to the steel surface was also investigated.

In Chapter 5, heating tests of steel plates with the metal spray coating were conducted. The heated temperatures were from 200°C to 700°C. The appearance of the specimens after heating was observed. Coating thickness was measured before and after the tests. The tests showed that the heated temperature can be roughly estimated by the appearance of the sealing material and coating.

In Chapter 6, the six-year exposure test of the specimens with metal spraying of Al-5Mg alloy and copper materials, and thick anticorrosion coat was conducted on a seawall in the Tomakomai west port to examine their anti-biofouling effect and anticorrosion performance. As a result, the anti-biofouling effect more than two years was not achieved by the coating specifications tested. However, the basic knowledge about anti-biofouling and corrosion prevention by metal spraying with Al-5% Mg alloy and copper materials, and thick anticorrosion coat was obtained.

In Chapter 7, the applicability of Al-5Mg alloy spraying to rebars in concrete members was investigated. Corrosion resistance and bond properties of the alloy sprayed rebar in concrete were examined. As a result, the corrosion resistance of the alloy sprayed rebar in concrete depended on the type and quantity of sealing treatment. This experiment demonstrated that the alloy sprayed rebar using a predetermined amount of epoxy coating as a sealing treatment has a good corrosion resistance even when the chloride content around the rebars is high. It was also confirmed by the pull-out test that the alloy sprayed rebar using epoxy coating has a good bond strength in concrete.

Chapter 8 describes the conclusions of this study and future prospects.