

令和 2 年 6 月 21 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06458

研究課題名（和文）素地調整を省略した橋梁点検時の応急塗装手法の確立と地方自治体の中小橋梁への適用

研究課題名（英文）Establishment of temporary coating technique performed with bridge inspection and application to existing bridges of local government

研究代表者

原田 隆郎（Harada, Takao）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授

研究者番号：00241745

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、橋梁定期点検において発見された桁中間部の軽微なさびや腐食に対して、素地調整を省略してスプレー塗料で対策する応急塗装を提案し、その有用性を確認した。具体的には、軽微な腐食を模擬した試験体に応急塗装を施し、複合サイクル促進試験によって換算5年の板厚減少量の変化を求め、腐食抑制効果を確認するとともに、現場適用試験による実橋に対する応急塗装手法の劣化抑制効果も確認した。その結果、素地調整を省略して、橋梁点検時に応急的なスプレー塗装を行うことは、さびをそのまま放置するよりも、腐食抑制効果があることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋梁点検時に応急塗装を実施しなかった場合、つまり、さびが生じている部位を次回点検まで無対策のまま放置した場合、鋼部材の劣化は少なからず進行する。よって、部分塗装の対象範囲でない鋼桁中間部の劣化部位に、少なくとも5年に1回の応急塗装を実施することで、比較的軽微な塗膜劣化や腐食を有する部材の耐久性延伸につながる。また、財政的に疲弊している地方自治体は、自らが抱える多くの中小橋梁に対して、応急塗装によるコスト縮減可能性のある塗替えシナリオを提示できる。

研究成果の概要（英文）：This study examined corrosion inhibition effect of temporary coating performed with bridge inspection through accelerated exposure tests and field tests. Because it is difficult to remove completely corrosion of steel substrates surface performed with bridge inspection, the temporary coating is carried out by spray painting without surface preparations of steel substrates. The corrosion inhibition effect of temporary coating is evaluated quantitatively by the variation of thickness of steel specimen before and after the accelerated exposure tests and the measurement of coating thickness of temporary coating in field tests. As the result, it was confirmed that the bridge steel member with temporary coating was more effective of corrosion inhibition than the member without temporary coating.

研究分野：維持管理工学

キーワード：地方自治体 橋梁点検 部分塗替え 応急塗装 素地調整

1. 研究開始当初の背景

地方自治体を含む橋梁管理者は、塗替え費用を縮減させる対応の一つとして、桁端部のような劣化の激しい部位のみ塗装する部分塗替えの導入を検討及び試行している。この部分塗替えでは、桁中間部の塗膜劣化やさびについては経過観察とし、桁端部と中間部の両方の劣化が進行したときに全面塗替えを行うという考え方が推奨されている。つまり、部分塗替えでは桁端部のみを対象とし、塗膜の浮きやはがれ、点錆のような比較的軽微な防食機能の劣化や腐食が生じている桁の中間部は、その長期的な健全性が担保されれば無対策としている。

一方、法令により橋梁点検が義務化されて、地方自治体が管理する中小橋梁も原則5年に1回の近接目視による点検が必要となった。しかし現在、点検業務と維持修繕業務は別発注であることが多く、点検者が鋼部材に塗装の浮きやはがれ、点錆のような局部劣化などを発見した際に、何らかの対応を取っている例は、一部の行政機関や道路会社等に限定されている。もし、このように必要に応じて応急処置（簡易塗装）を実施することが一般化できれば、部分塗替えを実施しなかった鋼桁中間部などの塗膜劣化や軽微な腐食部位に、応急的な処理を施すことができ、比較的軽微な塗膜劣化や腐食であれば、次回点検まで放置するよりも、部材の耐久性延伸につながると思われる。

2. 研究の目的

本研究では、橋梁の定期点検時に桁中間部に軽微なさびや腐食を発見した場合、それを放置せず、素地調整を省略してでも応急的なスプレー塗装で対策することの有用性を示すことを目的とし、以下の2つのアプローチを試みた。まず、ケレン等の素地調整を省略し、特にさび面に直接塗装する場合の、塗装前後の重量変化による鋼材の腐食減量に着目して実験的に評価した。このため、桁中間部に生じる軽微な腐食を模擬した試験体を作製し、複合サイクル促進試験によって腐食減量の経年変化を求めるとともに、桁中間部の軽微な劣化に対して、素地調整を省略した応急塗装を適用した場合の橋梁点検サイクルである5年間の腐食抑制効果を確認した。また、現場適用試験による実橋の応急塗装手法の劣化抑制効果の確認も行った。実環境における点検時塗装の劣化抑制効果を確認するため、一般供用環境に置かれている橋梁に対して、本研究で提案する応急塗装を施工し、その劣化抑制効果をモニタリングした。

3. 研究の方法

(1) 複合サイクル促進試験による応急塗装の腐食抑制効果の検証試験

本研究では、図1に示す流れで検証試験を実施した。試験体は、使用する複合サイクル促進試験機の重量制約を考慮し、図2に示すように、鋼種 SS400、寸法は縦 150mm×横 70mm×厚さ 2.6mm とした。また、塗装された実橋の桁中間部の軽微なさびを模擬するため、試験体には塗装された領域（図中の“既塗装領域”の3箇所）と、さびを発生させる領域（図中の“さび発生領域”の2箇所）を設定した。

まず、試験体の全面をブラスト（1種、ISO Sa 1/2）した後、試験体の“さび発生領域”をマスクキングし、鋼道路橋防食便覧¹⁾に示される塗替え塗装仕様の Rc-I 塗装系に準拠した仕様で試験体を塗装した。次に、塗装後に“さび発生部分”のマスクキングを外し、鋼材面が露出した部分にさびを生成させた。さびは、試験体を 3%の塩水に 1 分間浸漬させた後、気温 25±3℃、湿度 50±10%の室内に吊るし 24 時間自然乾燥させて生成した。本研究では、この工程を 10 日間繰り返してさびを発生させ、図3に示すように、本研究で対象とする実橋梁の桁中央部に生じる軽微なさびと対応させた。その後、試験体の“さび発生領域”に、応急塗装となるスプレー塗装を施した。本研究では 2 種類の塗料を使用した。一つは反応硬化型の変性エポキシ樹脂塗料（以下、塗料 S とする）であり、もう一つは防錆剤（以下、塗料 B とする）である。試験体との距離を 150～250mm としてスプレー塗装し、1 箇所の“さび発生領域”に対して各面 4 往復、塗料を塗布した。そして、塗料を乾燥させて、試験体を完成させた。本研究では、上記 2 種類のスプレー塗料（塗料 S と塗料 B）と、応急塗装を行わない（以下、無塗装（N）とする）の塗装 3 種類について換算 5 年の促進試験を行うことから、3 種類×5 年間=15 パターンの試験ケースを想定し、それぞれのケースについて 3 体の試験体（合計 45 体）を製作した。そして、5 年ごとの定期点検時に応急塗装を施すことを想定し、既往研究²⁾を踏まえ換算 5 年（185 サイクル）の複合サイクル促進試験を実施した。促進試験は、JIS K 5600-7-9 に準拠するサイクル D を用いた。サイクル D の試験条件は 1 サイクル 6 時間であり、塩水噴霧 2 時間→湿潤 1.5 時間→熱風乾燥 2 時間、温風乾燥 2 時間を 1 サイクルとして繰り返した。

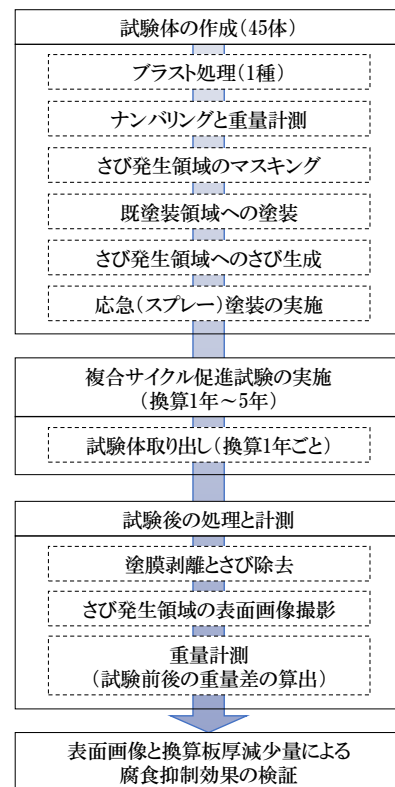


図1 検証試験の流れ

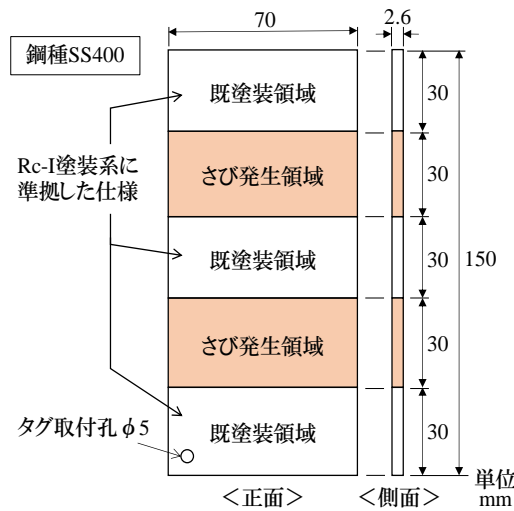


図2 試験体の概要

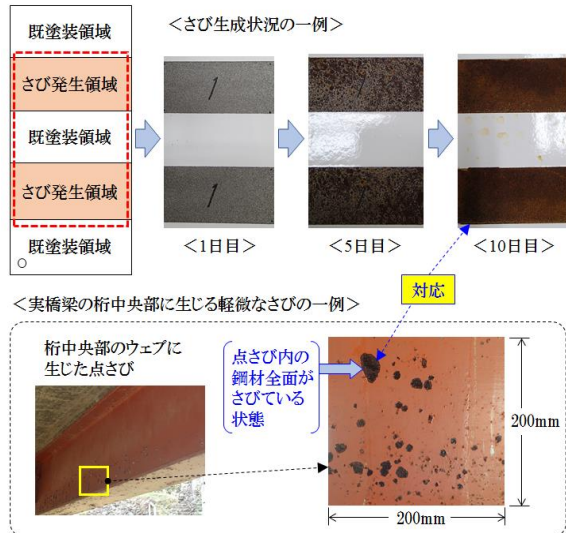


図3 さび生成状況と本研究で対象とする実橋梁の桁中央部に生じる軽微なさびとの対応の一例

(2) 実橋における応急塗装手法の劣化抑制効果確認のための現場適用試験

本研究では、実橋梁における応急塗装の耐久性の確認を目的として、図4に示す日立市内の実橋梁（供用開始1966年、橋長17.0m、全幅員3.6m、2径間単純鋼桁橋、海岸線から2.3kmにあり、凍結防止剤の散布なし）において応急塗装の現場適用試験を実施し、塗装効果の経過観察を行った。応急塗装の塗装範囲としては図5に示すように上流側の主桁内側の腹板と下フランジ上面であり、促進試験で使用した「塗料S」と「塗料B」を塗装した。塗装方法としては、さび面をケレン等で表面処理せず、塗膜面から30cm程度離れた箇所から直接スプレー塗装を行った。

応急塗装のモニタリング期間は、塗装後の約2年間（680日）である。応急塗装した部分の外観観察を行うとともに、腹板の高さ300mm×100mm、下フランジ



図4 試験対象橋の鋼桁部<塗装状況>

上面幅100mmの範囲の塗膜厚を計測した。試験体表面から鋼材面までの深さを、電磁式膜厚計（KC-260F、NDT マート&レンタル株式会社）によって3回計測し、平均値で整理した。

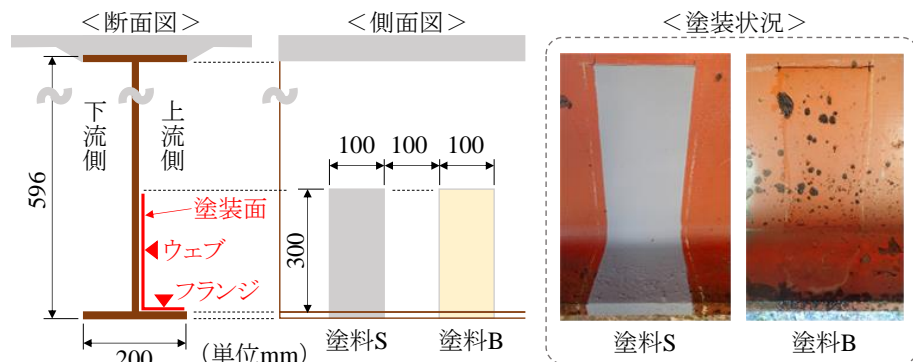


図5 実橋梁における応急塗装の範囲と塗装状況

4. 研究成果

(1) 複合サイクル促進試験による応急塗装の腐食抑制効果の確認

① 試験体表面の腐食状況

表1に、換算5年の促進試験後における無塗装（N）、塗料S、塗料Bの試験体表面の腐食状況を示す。示した鋼材表面画像は、図2における各試験体の2箇所「さび発生領域」のうち、上側の70mm×30mm領域の画像である。また、塗装種類ごと、換算年数ごとの試験体3体のうち、任意の1体のみを示している。

まず、5年間の促進試験における試験体の「さび発生領域」の表面画像から、無塗装の試験体では、換算5年では領域の至る所に径8~10mm程度の楕円形上の鋼材表面の凹み（腐食によって鋼材表面に生じたさびを除去した後に残ったへこみ）が見られ、孔食の兆しが確認できた。また、塗料B（防錆剤）のスプレー塗装を施した試験体でも、換算5年でも楕円形上の腐食による凹みが発生したが、凹みの個数や1個あたりの大きさ、「さび発生領域」での腐食面積より、無塗装と比較すると腐食抑制効果があることが確認できた。

一方、塗料S（エポキシ樹脂塗料）では、換算4年まで目立った腐食による凹みは見られず、換算5年で表面のざらつきや少しの凹みが生じた程度であった。結果として、塗料Sによる応急塗装は、無塗装と比べて腐食の進行を抑制できる効果があり、それは塗料Bよりもやや高いことがわかった。

表 1 促進試験後の鋼材表面の腐食状況（換算 1 年～5 年）

年数	無塗装(N)	塗料S	塗料B
換算1年			
換算2年			
換算3年			
換算4年			
換算5年			

②試験体の重量変化による板厚減少量

図 5～7 に、各塗装種類（無塗装（N）、塗料 S、塗料 B）における促進試験の換算年数（1～5 年）と換算板厚減少量 T_R (mm) との関係を示す。この図には試験体 3 体の換算板厚減少量をすべて示した。この試験結果をみると、無塗装（N）の試験体における換算 1 年や換算 5 年の板厚減少量に若干の値のばらつきは見られるが、その他の結果では試験体 3 体の板厚減少量にばらつきはほとんど見られなかった。

なお、換算板厚減少量とは、促進試験の実施前と実施後の試験体重量の変化と、その重量変化から換算した板厚減少量である。促進試験前の試験体重量は、試験体製作時の鋼材のブラスト直後に計測した重量である。一方、試験後の試験体重量は、促進試験後の試験体から塗膜を剥離し、さびを除去した後に計測したものであり、両者の差から促進試験による鋼材の腐食減少量を求めた。また本研究では、この重量変化から、“さび発生領域”における平均的な板厚減少量を次式によって計算し、これを換算板厚減少量 T_R (mm) とした。

$$T_R = \frac{W_b - W_a}{\rho \times A_{co}}$$

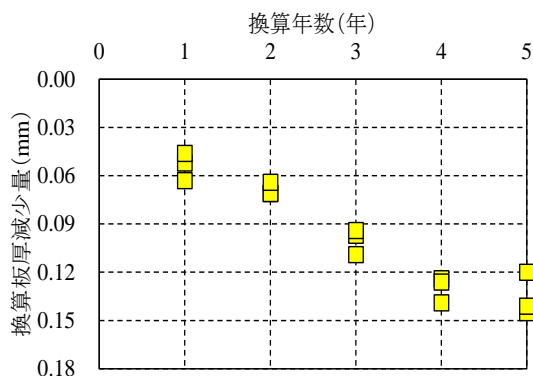


図 5 換算板厚減少量の経年変化(無塗装(N))

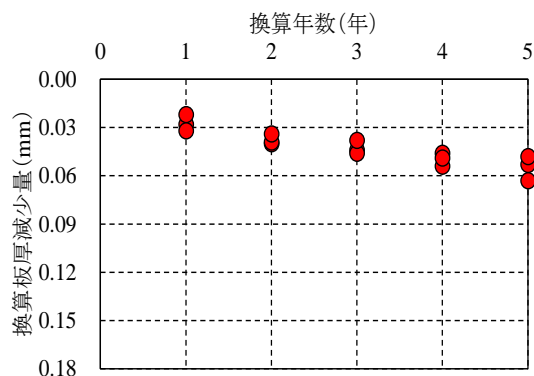


図 6 換算板厚減少量の経年変化(塗料 S)

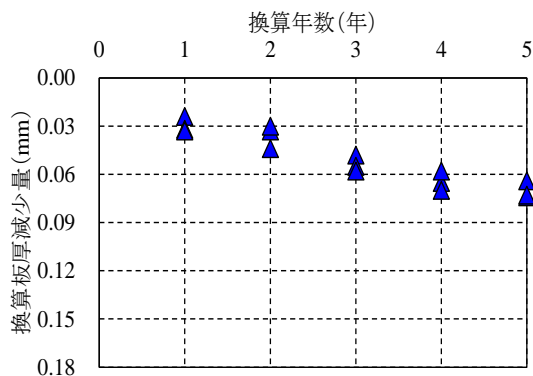


図 7 換算板厚減少量の経年変化(塗料 B)

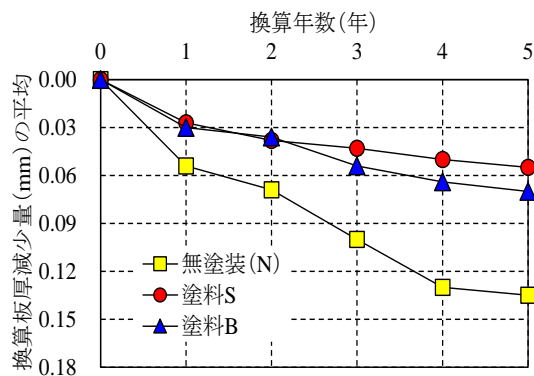


図 8 換算板厚減少量の経年変化(5 年)による応急塗装の腐食抑制効果の比較

ここで、 W_b ：促進試験前(ブラスト直後)の試験体重量(g)、 W_a ：促進試験後(塗膜剥離・さび除去後)の試験体重量(g)、 ρ ：鋼材(SS400)の密度($=7.85 \times 10^{-3}$ [g/mm³])、 A_{co} ：腐食面積(mm²)である。なお、本試験では、促進試験によって生じる鋼材の腐食は“さび発生領域”のみと限定し、70mm×30mmの領域が上下表裏で4面、側面の2.6mm×30mmの領域が上下左右で4面あると考え、腐食面積を(2100mm²+78mm²)×4面=8712mm²として計算した。

次に、図8に換算年数と換算板厚減少量の平均(試験体3体の平均値)との関係を示す。促進試験の実施前と実施後の試験体重量の換算5年間の板厚減少量(平均値)の関係から、無塗装の試験体の板厚減少量(換算5年で約0.13mm)に比べ、応急塗装を施した試験体(塗料Sや塗料B)の板厚減少量は約50%となっており、応急塗装を施す効果が現れていることがわかった。さらに、塗料Sと塗料Bは、換算2年までは同程度の換算板厚減少量(平均値)であったのに対して、換算3年以降で塗料Bの板厚減少量が、塗料Sのそれよりも若干大きくなった。これは、塗料B(防錆剤)の適用方法に問題があった(塗料Bは上塗り塗料と組み合わせて使用するタイプのものであった)ためであり、換算3年以降は防錆効果が弱まったことが原因と考えられる。

以上より、本研究で実施した複合サイクル促進試験の範囲内では、素地調整を省略して、橋梁点検時に応急的なスプレー塗装を行うことは、さびをそのまま放置するよりも、腐食抑制効果があることが確認できた。

③腐食抑制効果の長期予測

一般的に、橋梁点検に応急塗装を合算する場合、点検費用は割高になると予想されるが、もし全面塗替えから部分塗替え+応急塗装への完全転換が実現できれば、ライフサイクルコスト削減の有効な手法となると考えられる。そこで、応急塗装によって長期的(例えば100年間)な腐食抑制効果が期待できるかを検証実験の結果から予測した。ただし、検証実験では5年間の板厚減少量しか求まっていないこと、応急塗装を5年ごとに繰り返し実施するという前提であることなどの制約を踏まえた長期予測である。結果を図9に示す。100年間の板厚減少量は、無塗装(N)が約0.94mm、塗料Sが約0.20mm、塗料Bが約0.43mmとなった。ここで、板厚減少量の長期予測には、耐候性鋼材の腐食減耗量に関する式($y=ax^b$; y は板厚減少量(mm)、 x は換算年数(年)、 a 、 b は回帰係数)を利用した非線形回帰手法を用いた。この結果から、塗料Sと塗料Bの100年間における板厚減少量は0.5mm以下に抑制されており、無塗装(N)の約半分の板厚減少にとどまることが確認できた。つまり、桁中間部に実施する応急塗装は、長期において板厚減少を抑制できる可能性が高いものと推定される。

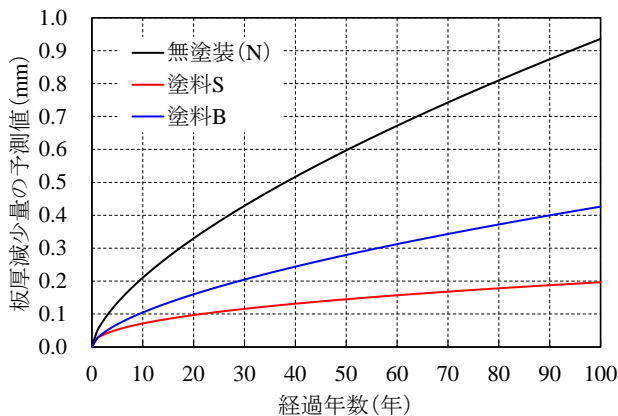


図9 検証実験結果に基づく板厚減少量の長期予測

(2)現場適用試験による実橋における応急塗装手法の劣化抑制効果の確認

図10に実橋梁に施工した応急塗装(塗料S、塗料B)のモニタリング期間における塗膜厚の減少量(μm)を示す。塗膜厚の減少量は、計測初日の塗膜厚を基準とした減少量である。また、○や△のマーカは計測値であり、実線や破線は曲線 $y=ax^b$ へ最小二乗法により当てはめを行った予測値である。なお、 y は塗膜厚の減少量(μm)、 x は塗装後の経過日数(Day)、 a 、 b は回帰係数である。約2年間(680日)のモニタリングにおいて、塗料Sと塗料Bのどちらにおいても、塗布部位(ウェブと下フランジ上面)の違いによる塗膜厚の減少量に大きな差は生じなかった。一方、塗料Sと塗料Bの違いについては、やや塗料Bの塗膜厚の減少量が大きい傾向があり、その差は20μm程度であった。この違いについては、塗装面の外観観察の結果より、塗料Bの方が塗料Sよりも塗膜厚にむらができ、液ダレも起こしやすいなど傾向があることがわかっている。また、塗料Bは本モニタリング開始から約2年程度で塗膜がほぼ消失し、実環境でのさび転換塗料の耐久性は低いことが確認されている。

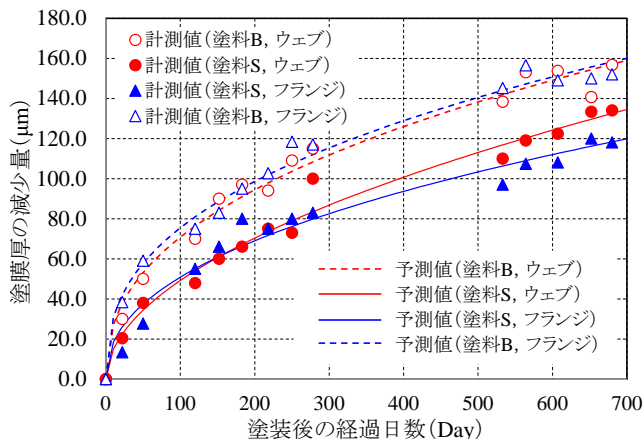


図10 実橋梁に施工した応急塗装の塗膜厚の変化

【引用文献】

- 1) 公益社団法人日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，丸善出版，2014。
- 2) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.129-140，1997。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 原田 隆郎、金森 豪、桑島 智明	4. 巻 65A
2. 論文標題 供用中の鋼製起伏堰を対象とした実用的な更新計画の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 111 ~ 120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11532/structcivil.65A.111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 原田 隆郎	4. 巻 66A
2. 論文標題 橋梁点検時における応急塗装の腐食抑制効果に関する実験的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 400 ~ 409
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11532/structcivil.66A.400	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田隆郎
2. 発表標題 橋梁長寿命化修繕計画での利用を目的とした部材劣化予測手法の提案
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北村耕一
2. 発表標題 既設橋梁の腐食部に対する応急的な補修塗装手法に関する研究
3. 学会等名 土木学会第71回年次学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 作山卓也
2. 発表標題 鋼橋点検時における下地処理を省略した応急的塗装に関する研究
3. 学会等名 土木学会第71回年次学術講演会
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----