

既設耐候性鋼橋梁の腐蝕減耗量予測法の高度化

武邊 勝道¹

松江工業高等専門学校 環境・建設工学科

島根県益田市にかかる表面処理された耐候性鋼橋梁を対象に、実橋梁の腐食状況評価と鉄連法を組み合わせ、将来の腐食減耗量の検討を行った。海岸からの距離が 800 m と近い A 橋の桁端では層状剥離や固着さびが発生している。裸仕様の暴露試験片の減耗量予測でも、板厚減耗量が数 10 年後に 1 mm 以上に達する結果が得られ、A 橋の桁端部については早急な補修計画の策定が必要であると考えられる。海岸からの距離が 1100 m と 1700 m の B 橋と C 橋には、かさぶた状のさびが確認されたが、腐食悪化部の面積割合は小さかった。また、桁内の飛来塩分量が 0.18 mdd と高いにも関わらず、裸仕様試験片の 100 年後の予測両面腐食減耗量は 1.0 mm を下回った。したがって、今後数 10 年程度は、十分な耐食性を示す可能性があると期待される。

キーワード：耐候性鋼橋梁，腐食減耗量，鉄連法

1. はじめに

近年、道路交通網の維持を目的として道路橋の長寿命化修繕計画が進められている。高度経済成長期に整備された橋梁の中には老朽化し始めているものもあり、これらを適切に維持管理し、道路ネットワークの安全性を確保することが求められている。ライフサイクルコストを縮減しながら、道路橋の交通網を維持してゆくためには、適切に予防保全を立てて、実行する必要がある。

ライフサイクルコストを縮減する観点から近年広く共用されている橋梁に、耐候性鋼橋梁がある。耐候性鋼はその表面に保護性さびが形成される特長を持ち、この保護性さびが防食塗装の代替の役割を果たす。このため、防食目的の塗装の塗り替えを必要としない場合が多く、塗装橋梁の場合には欠かすことの出来ない塗装の塗り替え作業やそのコストを省略することが出来る。ただし、保護性さびの生成は周りの環境の影響を受けるため、耐候性鋼橋梁は不適切な環境下では十分な耐食性を示さない。このことをふまえ、道路橋司法書¹⁾には耐候性鋼橋梁の適応可能な環境が示されている。しかし、その指針が示される前に建設された耐候性鋼橋梁には不適切な環境で供用されているものも存在する。したがって、耐候性鋼橋梁の予防保全を的確に行うには、腐食環境の厳しい環境に共用された橋梁が、この先どの程度の板厚減耗量に達するかを解析する必要がある。

現在行われている一般的な耐候性鋼橋梁の点検は、橋梁の現状確認に留まっており、その調査結果のみか

らでは将来の腐食減耗量を予測することは難しい。橋梁建設前の環境調査の一つとして、1年間大気曝露した試験片の腐食減耗量から耐候性鋼の100年後の腐食減耗量を予測する手法(鉄連法)^{2),3)}が提案されているが、この手法は1年間のデータから100年後を予測するため、予測結果に大きな誤差を含む。申請研究では、鉄連法と実橋梁の腐食状況評価を組み合わせ、将来の腐食減耗量の予測することを目指す。

2. 対象橋梁と分析方法

本研究では、島根県益田市の沖田川に架かる3つの橋梁(A橋, B橋, C橋)を分析対象とした。A橋, B橋, C橋の海岸からの直線距離は、それぞれ、800 m, 1100 m, 1700 m である。これらの橋梁は、すべて1985年に建設された耐候性鋼橋梁(SMA50AW)であり、ウェザーコート処理が施されている。いずれも2主桁の橋梁であるが、A橋には桁端に耳桁がある。各橋梁とも上流側桁の桁端周辺を調査対象とした。

まず、各橋梁の腐食状況をイオン透過抵抗法で評価した^{4),5),6)}。また、鋼板板厚を超音波板厚計で計測した。なお、桁端末端部の、表面処理材が完全残存する腐食が見られない部分の板厚値を健全部の板厚とした。ウェブでは、桁内側のグラインダーでさびを落とした面から計測した板厚を腐食部1の板厚とし、桁外の表面処理皮膜が残存する平滑面から、皮膜厚を考慮して計測した値を腐食部2の板厚とした。下フランジについては、上下面ともグラインダーでさびを落とした後に板厚を計測した。上面または下面からの板厚計測値

を、それぞれ、腐食部1または腐食部2の板厚値とする。ワッペン暴露試験では、JIS-SMA 耐候性鋼材の試験片を、ウェブの桁内面と桁外面、桁内側下フランジの上面と下面を挟むように貼付した。試験片は2011年8月からの1年間暴露した。また、飛来塩分量調査を、ドライガーゼ法で2011年9月からの1年間行った。

3. 結果

(1) 橋梁の腐食状況

a) A 橋

図-1 に、各橋梁においてワッペン暴露試験片を貼付した部分のイオン透過抵抗法を用いた評価区分図を示す。今回分析した橋梁の中では、A 橋の桁端付近の腐食が最も著しい。中でも桁内側下フランジ上面は層状剥離を起こしている。桁内側下フランジ上面は、評価図上では I-2 に分類されるものの、層状剥離が生じていることを考慮すれば、I-1 に相当すると考えられる^{2),6)}。下フランジ下面には表面処理皮膜が残っているが、手で触れるとさびと共に簡単に剥落する。下フランジ下面の膜厚は 500 μm 前後で、イオン透過抵抗値は数 100 $\text{k}\Omega$ 前後であり、I-3 に分類される。桁内のウェブ面の下部 10 cm の部分には、非常に厚い固着さびが発達している。固着さびが発達する部分の膜厚は 1000 μm 前後の値を示し、イオン透過抵抗値も 1 $\text{k}\Omega$ を下回り、I-1 に相当する。ウェブの下から 10 cm より上の部分も全面に腐食が進行しており、膜厚が 800 μm 程度、イオン透過抵抗値が 300 Ω 程度であり、I-2 に相当する。桁外側下フランジ上面は、桁内と異なり層状剥離が観察されることは無い。ウェブ面近傍からエッジに向かって腐食がより激しくなり、エッジ付近では 1cm 程度の鱗状のさびが分布している。上面下面共に膜厚は 500 μm 程度、イオン透過抵抗値は数 100 $\text{k}\Omega$ であり、I-3 に分類される。桁外側ウェブ面には鋼板面に密着した表面処理皮膜が残存しており、部分的にさびへの置き換わっている。膜厚は 100 μm を下回り、イオン透過抵抗値は 1 $\text{k}\Omega$ を上回り、I-4 に分類される。ウェブ、下フランジ共に腐食部の板厚減少が大きく(図-2)健全部と腐食部2の板厚は、ウェブで 1 mm 以上、下フランジで 3 mm 程度の違いがある。

(b) B 橋

A 橋に比べると B 橋の腐食の進行は相対的には穏やかである。桁内側下フランジ上面は 1 cm 前後のかさぶた状のさびで覆われており、膜厚は 500~1000 μm である。イオン透過抵抗値は 500 Ω 前後であり、イオン透過抵抗法では I-3~I-2 に分類される。下フランジ下面にも、鱗状またはかさぶた状のさびが分布してい

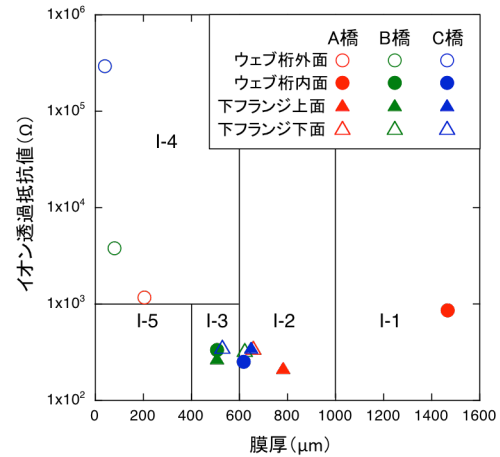


図-1 A 橋, B 橋, C 橋の、ワッペン暴露試験片貼付部のイオン透過抵抗法評価結果

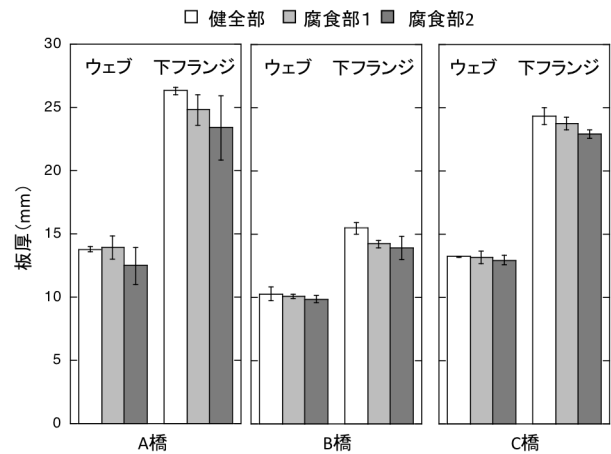


図-2 A 橋, B 橋, C 橋の板厚計測結果

る。これらのさびは手で触ると剥落する。腐食の進行は桁内側のエッジ部で顕著である。この部分の膜厚は 500~1000 μm で、イオン透過抵抗値は 500 Ω 前後あり、I-3~I-2 に分類される。一方で、桁外側のエッジ部分の膜厚は数 100 μm で、イオン透過抵抗値も数 $\text{k}\Omega$ であり、I-4 と分類される。桁内側ウェブ面は下部 10 cm は径 1 cm 弱の鱗さびに覆われており、さび厚は 500~800 μm 、イオン透過抵抗値は 500 Ω 程度で、I-3~I-2 に分類される。ウェブ面の下から 10 cm よりも上の部分では、表面積の数割程度に表面処理皮膜が残っており、さび厚も数 100 μm と薄い。イオン透過抵抗値は 400 Ω 前後で、I-3 と分類される。桁外側のウェブ面および下フランジ上面の腐食はあまり進んでいない。ウェブ面には広い面積で表面処理皮膜が残っており、さびに置き換わった部分も平滑である。膜厚は 50~200 μm 程度、イオン透過抵抗値は 1~10 $\text{k}\Omega$ で、I-4 に分類される。桁外側下フランジ上面は、表面処理皮膜がさびに置き換わっており、膜厚は数 100 μm

で、イオン透過抵抗値は数～10 kΩ で、I-4 に分類される。板厚の減少量は A 橋に比べると小さい(図-2)。健全部と腐食部 2 の板厚平均値の差は、ウェブで 0.5 mm 弱、下フランジで 1.5 mm 程度である。

(c) C 橋

C 橋の腐食の進行状況は B 橋に似ている。桁内側下フランジ上面は 1 cm 前後のかさぶた状のさびで全面が覆われている。膜厚は 500～1000 μm で、イオン透過抵抗値は、イオン透過抵抗値は 500 Ω 前後であり、イオン透過抵抗法では I-3～I-2 に分類される。下フランジ下面は B 橋に比べて腐食の進行が穏やかで、表面処理皮膜が残っている部分も多い。腐食が進んでいるのは桁端部のみである。膜厚は数 100～800 μm、イオン透過抵抗値は 500 Ω ～数 kΩ とばらつきがある。I-4～I-3 と分類されるが、I-3 に相当する部分は広くない。桁内側ウェブ面の腐食も、B 橋より穏やかで、表面処理皮膜が残存する面積は B 橋より広く、4 割程度に達する。ウェブ最下部の腐食が著しいが、その幅も B 橋よりも狭く、5 cm 程度である。最下部の膜厚は 700 μm、イオン透過抵抗値は 500 Ω 程度であり、I-2 と分類される。一方で、ウェブ上部は、膜厚は 300 μm 程度、イオン透過抵抗値は 1 kΩ 程度であり、I-4 と分類される。桁外側のウェブ面には、ほぼ全面に表面処理皮膜が残存しており、表面処理皮膜の退色が観察される。膜厚が 50 μm 程度、イオン透過抵抗値は数～数 100 kΩ である。退色した表面処理皮膜が残存していることから、さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の評価基準²⁾の B と判断される。桁外側下フランジ上面は、広い部分で補助処理皮膜がさびに置き換わっている。全体的に平滑であり、1 mm 程度のさびの凹凸が所々に散点している。膜厚は 50 μm 程度、イオン透過抵抗値は数～数 10 kΩ であり、I-4 と分類される。板厚の減少量は B 橋よりも小さい(図-2)。健全部と腐食部 2 の板厚平均値の差は、ウェブでは 0.25 mm、下フランジで 1.5 mm 程度である。

(2) 飛来塩分量

いずれの橋梁でも桁下および桁内の飛来塩分量が多い。1 年間の平均値は、A 橋の桁下が 0.8 mdd、桁内が 0.6 mdd である、B 橋と C 橋は、桁下が 0.5 mdd、桁内が 0.18 mdd である。

4. 考察

(1) 実橋梁の板厚減少量とワッペン暴露試験片結果に基づく腐食減耗量予測値との比較

図-3 に暴露試験片の 1 年後の減耗量(A_{SMA})を示す。腐蝕減耗量は A 橋で最も大きく、C 橋で小さい。いず

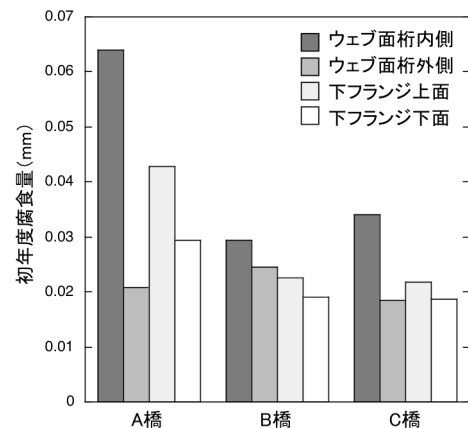


図-3 初年度腐食量

れの橋梁でもウェブの桁内面の腐食が大きい。また、下フランジは上面の減耗量が多い。

A 橋では、ウェブ桁内面での初年度腐食量が 0.06 mm を超え、下フランジ上面が 0.04 mm、下フランジ下面が 0.03 mm 弱で、ウェブ桁外が最も低くて、0.02 mm であった。B 橋では、ウェブ桁内面での初年度腐食量が 0.03 mm 弱であり、次いでウェブ桁外が 0.025 mm、下フランジ上面が 0.04 mm であった。A 橋とは異なり、下フランジの腐食量はウェブ面よりも低く、その腐食量は 0.02 mm 前後である。下フランジ上面の方が下面よりも腐食量が多い。C 橋では、ウェブ桁内面での初年度腐食量が B 橋より高く 0.034 mm であり、他の部位の腐食量は 0.025 mm 前後である。

裸仕様の耐候性鋼材の累積減耗量 Y (mm) は、裸仕様の耐候性鋼材の初年度腐食量 A_{SMA} 、生成さびの保護性を表す B_{SMA} 、暴露期間 X (年) を用いて次式で表される^{5), 7), 8), 9), 10)}。

$$Y = A_{SMA} \cdot X^{B_{SMA}} \dots (1)$$

A_{SMA} から B_{SMA} を推定し¹⁰⁾、(1) 式を使って予測腐食減耗量を計算した。図-4 にウェブの桁内側と桁外側、また、下フランジの上面と下面に貼付した暴露試験片から得られた計算結果の和の経年変化を示した。この予測結果は、裸仕様の耐候性鋼材の腐食減耗量の予測値である。図-4 には、各橋梁の板厚減少量を建設 27 年後の値としてプロットした。

表面処理材は、処理皮膜が鋼板面上に存在することで腐食環境を緩和する T 機能と、保護性さび形成を補助することで腐食速度を低減する P 機能を持つ²⁾。表面処理を施した鋼材の累積減耗量 Y (mm) は、本格的な腐食開始が遅れた期間 T (年)、 A_{SMA} や B_{SMA} に相当する腐食パラメータ A と B 、暴露期間 X (年) を用いて、次式のように表せる。

$$Y = A \cdot (X - T)^B \dots (2)$$

原理的には、(1)式で導かれる裸仕様鋼材の累積減耗量よりも、(2)式で計算される表面処理仕様鋼材の累積

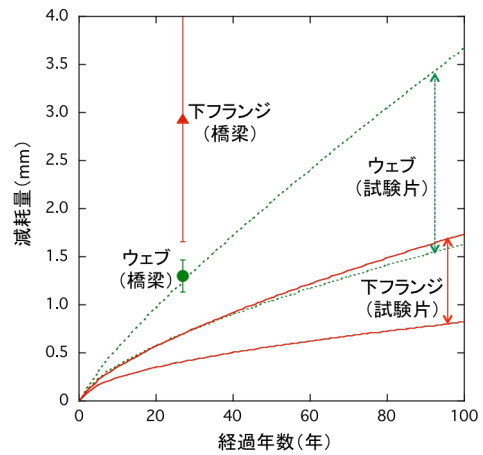
減耗量の方が小さくなるはずである。しかし、下フランジの分析結果では、実橋梁の表面処理仕様鋼材の方が無塗装仕様の暴露試験の推定より減耗量が数倍大きくなった。これらの部位の下フランジでは腐食の進行が著しい一方で、その他の部位の腐食は相対的に穏やかで、表面処理皮膜が残存する部分も多いことに関連する可能性がある。面積率では、腐食悪化部は桁全体の1割程度である。鋼材の腐食は電位差が生じることで進行する。このため、表面処理皮膜が残る部分が広く存在するほど、電位差が生じ、局所部分の腐食が進行しやすくなると考えられる。つまり、他の部分の表面処理材が腐食の抑制に寄与したために、腐食環境の厳しい桁端の下フランジの腐食が促進された可能性がある。

実橋梁のウェブの板厚減少量は、裸仕様の暴露試験片の予測値に近い値となった。橋梁の表面処理材が腐食の開始を遅らせる機能を発揮し、式(2)のTが大きな値である場合には、図-4のグラフ上で、実橋梁の累積減耗量が27年目の減耗量を通して、式(2)のAまたはBが、式(1)の A_{SMA} や B_{SMA} に比べてより大きい必要がある。その場合、将来の橋梁鋼板の累積減耗量は、裸仕様の試験片で推定した累積減耗量の上限値を大きく越える可能性がある。一方、表面処理材が早い段階で風化・消失した場合、その後の鋼材は、裸仕様の耐候性鋼材と同様の累積減耗量をたどると考えられる。ただし、橋梁全体での電位差のために、ウェブ桁内側下部の腐食がより進行する可能性もある。

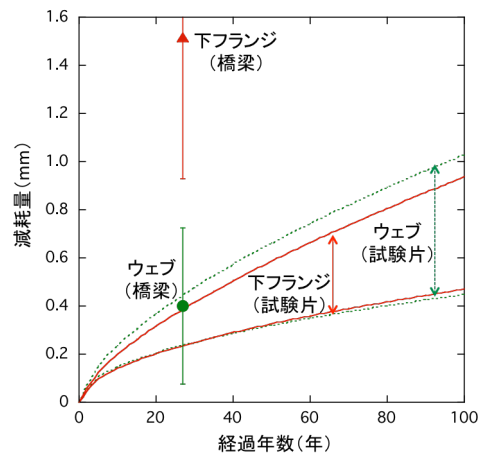
(2) 各橋梁の腐食環境と腐食状況について

耐候性鋼橋梁の設計共用期間100年¹⁾に対応する環境限界内での片側累積腐食量は0.5mmとされている⁸⁾。ただし、今回調査した実橋梁の腐食減耗量は局所的な減厚減量である。実橋の板厚減耗量が部分的に0.5mmの2倍の1.0mmを越えたとしても、すぐに耐荷力不足になるとは言えない。一方で、暴露試験片は、貼付した部位周辺の平均的な腐食減耗量を表していると考えられる。橋梁鋼板減耗量は、下フランジの調査部位は、すべての橋梁で1mmを越えており、ウェブではA橋のみ1mmを越えた。一方、暴露試験結果に基づく100年後の腐食減耗量予測の中央値は、A橋で下フランジとウェブ面が共に1mmを越え、B橋とC橋では共に1mmを下回る。

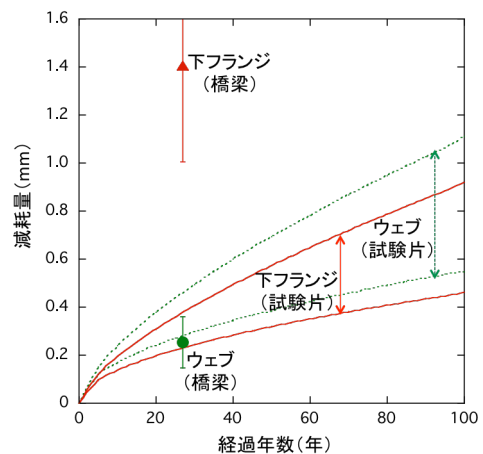
A橋では層状剥離や厚い固着さびが観察されており、その範囲も桁端の広範囲に渡ることから、補修の必要性があると判断される。こうした腐食の激しい部分に表面処理材が残存しているとは考えられず、この先、裸仕様鋼材と同様の累積腐食を生じると考えられる。



(a) A橋



(b) B橋



(c) C橋

図-4 実橋梁の板厚減少量と暴露試験片結果に基づく腐食減耗量予測値との比較

裸仕様の暴露試験結果は、数10年後に板厚減耗量が1mmを越える可能性を示している。加えて、桁内の飛来塩分量は0.6 mddと高い。以上のことから、桁端周辺の腐食はさらに進行することが予想される。A橋

の桁端部においては、比較的早い段階で、維持補修の計画を立て、実行することが必要であると言える。

B橋とC橋では、局所的にはI-2に相当する部分が存在するものの、表面処理材が残る部分が広く存在しており、耐荷力の維持を目的とした緊急の補修を必要とする状況であるとは考えられない。裸仕様の暴露試験片で100年後の腐食減耗量が1mmを下回ることから、この橋梁の環境では、裸仕様であっても設計共用期間に十分な耐荷力を維持する可能性がある。B橋とC橋の橋梁の桁内の飛来塩分量は平均で0.18 mddと高い。山陰地域では、桁内の飛来塩分量が0.1~0.2 mddと高い橋梁であっても、100年後の片面厚減耗量予測値が0.5mmに達しない例が報告されている¹¹⁾。B橋とC橋の裸仕様の試験片の減耗量が低い結果は、山陰地域の特性を表す可能性もある。

B橋とC橋を取り巻く環境で、裸仕様の耐候性鋼材でも十分な耐食性を示すことは、少なくとも数10年後の段階で、B橋とC橋の補修が必要となる可能性が低いことを示している。ただし、暴露試験片に比べて下フランジの腐食が大きいことから、この部分の腐食が局所的に進行する恐れもある。このため、下フランジの定期点検は必要であると考えられる。

5 まとめ

本研究では、島根県益田市にかかる表面処理された耐候性鋼橋梁を対象に、実橋梁の腐食状況評価と鉄連法を組み合わせて、将来の腐食減耗量の検討を行った。海岸からの距離が800mと近いA橋の桁端では層状剥離や固着さびが発生している。裸仕様の暴露試験片の減耗量予測でも、板厚減耗量が数10年後に1mm以上に達する結果が得られ、A橋の桁端部については早急な補修計画の策定が必要であると考えられる。

海岸からの距離が1100mと1700mのB橋とC橋には、さぶた状のさびが確認されたが、腐食悪化部の面積割合は小さかった。また、桁内の飛来塩分量が0.18 mddと高いにも関わらず、裸仕様試験片の100年後の予測両面腐食減耗量は1.0mmを下回った。したがって、今後数10年程度は、十分な耐食性を示す可能性があるかと期待される。

一方で、各橋梁の下フランジの板厚減少量は、裸仕様の暴露試験片から予測される値よりも数倍大きくなった。各橋梁に局所的な腐食悪化部がある一方で、表面処理材が残る部位が広く存在するために、桁鋼板の

中で電位差が生じ、部分的な腐食が促進されている可能性がある。今後、この局部腐食の加速の程度を見積もる必要があると考えられる。

謝辞：A橋、B橋、C橋を調査するにあたっては、益田市役所土木部にご配慮頂いた。ここに記して、感謝申し上げる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋司法書・同解説書，2012.
- 2) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 73 「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」，2006.
- 3) (社)日本鋼構造協会：テクニカルレポート No. 86 「耐候性鋼橋梁の適用生評価と防食予防保全」，2009.
- 4) 今井篤美，立花仁，松本洋明，紀平寛：鋼構造物の腐食診断に向けたイオン透過抵抗法の適用，防錆管理，Vol. 51，No. 5，pp. 216-221，2007.
- 5) 紀平寛，塩谷和彦，幸英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集，No.745/I-65，pp. 77-87，2003.
- 6) 今井篤美，大屋誠，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態とその評価，土木学会論文集，印刷中，2013.
- 7) 建設省土木研究所，(社)鋼材クラブ，(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告 (XX) -無塗装耐候性鋼橋梁の設計・施行要領 (改定案)，1993.
- 8) 三木千尋，市川篤司，鶴飼真，竹村誠洋，中山武典，紀平寛，無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案，土木学会論文集，No.738/I-64，2003.
- 9) 建設省土木研究所，(社)鋼材クラブ，(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告 (XV)，1992.
- 10) 紀平寛，田辺康児，楠隆，竹澤博，安波博道，田中陸人，松岡和巳，原田佳幸：耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 780/I70，71-86，2005.
- 11) 安達 良，大田隼也，北川直樹，落部圭史，立花裕輔，麻生稔彦，梶谷慧，原貴之，大屋誠，武邊勝道，松崎靖彦：短期曝露試験における鋼種ごとの減耗量の差異，平成20年度土木学会全国大会 第63回年次学術講演会，仙台，東北大学，2008.