30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査*

境 昌宏**, 長谷部智久***, 美馬大樹†, 西 弘明††, 小室雅人†††, 岸 徳光†††

** 室蘭工業大学 もの創造系領域

*** 国土交通省 北海道開発局 小樽開発建設部

† 国土交通省 北海道開発局 室蘭開発建設部

†† 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所

††† 室蘭工業大学 くらし環境系領域

Investigation into Corrosion of Surface Treated Weathering Steel Bridges for More Than 30 Years*

Masahiro Sakai**, Tomohisa Hasebe***, Hiroki Mima†, Hiroaki Nishi††, Masato Komuro††† and Norimitsu Kishi†††

** College of Design and Manufacturing Technology, Muroran Institute of Technology

*** Otaru Development and Construction Department, Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

† Muroran Development and Construction Department, Hokkaido Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

†† Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute

††† College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology

In order to investigate the corrosion of surface treated weathering steel bridges constructed more than 30 years ago, we conducted a visual inspection, a measurement of rust and coating thickness, a measurement of ion transfer resistance, cross-sectional observation by the reflected polarized light and EPMA analysis. The rust appearances of 57 points out of 78 were assessed normal by the visual inspection. Imbricate and layer-delaminated rusts were observed at the some ends of the bridge beam from which water used to be leaking. The rank of the rust appearance tends to decrease with an increase in the thickness of rust and coatings. The cross-sectional observation and EPMA analysis revealed that the condensed Cl existed at the bottom of the anomalous rust, while the optically isotropic layer of protective rust existed at the bottom of the normal rust.

Key words : weathering steel bridge, corrosion investigation, surface treatment, thickness of rust and coatings, ion transfer resistance, corrosion potential, EPMA

1. 緒 言

現在、高度経済成長期に建設された多くの橋梁など道路ストックの高齢化が進み、今後疲労や劣化などの損傷が深刻になることが懸念されており、損傷が軽微な段階で補修を行うなどの計画的な道路管理が重要となっている。橋梁材のうち、耐候性鋼材は無塗装でも優れた防食性を発揮するため、ライフサイクルコスト低減の観点から一定の条件を満足する環境下において広く使用されている。耐候性鋼橋梁は表面処理を施さない裸仕様とさび安定化処理と呼ばれる表面処理を施した表面処理仕様とに分かれる。このうち、裸仕様の耐候性鋼橋梁に関する腐食調査事例はこれまでにいくつかの報告がなされている^{1)~3)}。一方、表面処理仕様耐候性鋼橋梁、しかも架設

から 30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁に関する腐食調査の報告事例はこれまでにない。著者らは、表面処理仕様耐候性鋼橋梁の保守点検、補修の必要性判断の一助となることを期待し、架設から 30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査を実施した。具体的には、外観目視調査、さび・被膜厚測定、断面観察、EPMA 分析などの調査を行ったので、本報告ではその調査結果について述べる。また、実橋梁から切り出したサンプルの自然浸漬電位測定も行ったので、その結果についても報告する。

2. 腐 食 調 査

2.1 調査対象耐候性鋼橋梁

腐食調査を実施した橋梁は室蘭新道を構成する道路橋である。Fig. 1 にその外観の一例を示す。室蘭新道は札幌、室蘭を結ぶ国道 36 号線のうち、室蘭市内を通過する延長約 4.2 km の自動車専用道路であり、このうち耐候性鋼材が使用された橋梁延長は約 2.1 km、使用された耐候性鋼材は約 7,800 t である。室蘭新道の主要部分を構成する 5 つの橋梁の建設は 1973 年から 1980 年にかけて行われ、いずれの橋梁も建設から 30 年以上が経過している。また、いずれの橋梁も離岸距離 2 km 以内の地点に存在し、平成 16 年度に行われた飛来塩分量調査では飛来塩分量の平均値は 0.114 mdd であった⁴⁾。一般に無塗

* 第 58 回材料と環境討論会 (2011 年, 名古屋) で発表

** 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1 (27-1, Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585 Japan)

*** 〒047-8555 小樽市潮見台 1 丁目 15 番 5 号 (1-15-5, Shiomidai, Otaru, 047-8555 Japan)

† 〒051-8524 室蘭市入江町 1 番地 14 (1-14, Irie-cho, Muroran, 051-8524 Japan)

†† 〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号 (Hiragishi, 1-3-1-34, Toyohira-ku, Sapporo, 062-8602 Japan)

††† 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1 (27-1, Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585 Japan)

Fig. 1 Appearance of Muroran shin-dou ; Muroran shin-dou is a motorway bridge constructed more than 30 years ago.

装仕様耐候性鋼の適用可能地域は飛来塩分量が0.05 mdd以下の地点とされており⁵⁾，上記塩分量はその約2倍と高い値を示している。室蘭新道に使用された耐候性鋼材(JIS G3114 SMA41A, SMA50A など)は，リン酸塩/アクリル樹脂複層型処理剤を用いた表面処理が施されている。

2.2 腐食調査内容および調査箇所

今回の報告では，現地調査として実施した(1)外観目視調査，(2)電磁膜厚計((株)ケット科学研究所，LZ-900J)によるさび・被膜厚測定，(3)イオン透過抵抗測定装置(日鉄防蝕(株)，RST(Rust State Tester))によるイオン透過抵抗測定の結果について述べる。また，室内試験として，(4)偏光顕微鏡((株)ニコン，OPTIPHOT-100)によるさび断面観察，(5)EPMA((株)島津製作所，EPMA-1400)による面分析を行ったので，その結果についても報告する。調査箇所は橋梁の桁中間部および端部とし，箱桁および鈑桁それぞれフランジ，ウェブの代表的な78カ所について実施した。ただし，(4)および(5)の調査については78カ所のうち代表的な数カ所について実施した。

2.3 自然浸漬電位測定

実橋梁から切り出した試験片の自然浸漬電位を0.1 M Na₂SO₄溶液中で測定した。比較のため，(1)溶接構造用圧延鋼新材 JIS G3106 SM490YB (以下，普通鋼新材)，(2)溶接構造用耐候性熱間圧延鋼新材 JIS G3114 SMA490BW (以下，耐候性鋼新材)，(3)実橋梁から切り出した鋼材で，グラインダーによりほぼ全面地鉄が出るまでさび落とししたもの(以下，さび落とし材)，(4)実橋梁から切り出した鋼材でさび付着のもの(以下，さび付着材)の4サンプルについて，エレクトロメーター(北斗電工(株)，HA-1510)を用いて測定を行った。測定条件は，液静止，大気開放，室温(25℃)とした。参照電極には飽和 KCl 中銀-塩化銀電極(以下，Ag/AgCl 電極)を用いた。測定時間は4サンプルの電位が定常値に達するまでとした。

3. 結果および考察

3.1 腐食調査結果

3.1.1 外観目視結果

過去にも今回の報告と同じ室蘭新道などにおいて腐食調査が行われており，その結果をもとに表面処理を施した耐候性鋼材の健全度評価基準案が2004年に提案されている⁴⁾(以下，この2004年に提案された評価基準案を2004年度評価基準案と呼ぶ)。今回の腐食調査においても，2004年度評価基準案に準拠し，外観目視評価を行った。ただし，2004年度評価基準案にある「被膜にさびが見られない。または，被膜の下や中にわずかなさびが見られる(評点A, B)」状態は，「腐食が進まず，薄いさび(評点5)」と同じグループに分類した。2004年度評価基準案では，被膜外観評価とさび外観評価が区別されているが，評点A, Bおよび評点5いずれの場合も，腐食が進まず健全な外観である点では共通であるため，今回の外観目視評価では両者を同じグループに分類した。

また，今回の外観目視評価では，2004年度評価基準案にあるさび面積率を省略した。さび面積率はさび外観評価に付与される項目であり，さび面積率によって，さび外観評点が変わるわけではない。さび面積率の違いがさび外観評点に影響を及ぼさないこと，後述する断面観察結果から腐食状況とのあいだに相関が見られなかったことから，今回の調査ではさび面積率を用いずに外観目視評価を行った。

具体的には，外観目視によりさび外観を以下の5段階評点で判定した。評点5は表面処理被膜が多く残っている，あるいは腐食が進まず薄いさびの場合，評点4は微細で外観平均粒径1 mm程度の均一なさびの場合，評点3は微細で外観平均粒径が1~5 mm程度のさびの場合，評点2は外観平均粒径5~25 mm程度のうろこ状さびが生じている場合，あるいは硬いこぶ状さびが生じている場合，評点1は層状剥離が生じているさびの場合である。2004年度評価基準案に基づき，評点5~3を「正常(normal)」，評点2を「要観察(care)」，評点1を「異常(critical)」と分類した。Fig. 2に今回調査した箇所のうち，評点5から評点1のさび外観の一例を示す。

Fig. 2 Appearances of rust formed on the weathering steel used for Muroran shin-dou.

この判定基準に基づき、今回調査した 78 カ所のさび外観評点の分布を Fig. 3 に示す。調査した 78 カ所中、57 カ所は評点 3 以上の正常さびと判定された。57 カ所の内訳は桁中間部が 38 カ所、桁端部が 19 カ所であった。評点 1 の層状剥離さびは 11 カ所であり、桁中間部において 2 カ所、桁端部において 9 カ所確認された。評点 1 の層状剥離さびが桁端部において多く確認されたのは、過去に伸縮装置などから凍結防止剤を含んだ水が漏水していたことに加えて、日当たりや風通しの悪さなどの環境条件が重なったことで、正常なさびが形成されなかったことが原因と推察される。なお今回の調査において確認された評点 1 の層状剥離さびの箇所などについては、必要に応じて順次、止水対策や補修が行われているところである。評点 2 のさびは桁中間部に 8 カ所、桁端部に 2 カ所確認され、桁中間部の方が多かった。桁中間部で確認された評点 2 のさび 8 カ所のうち、2 カ所は外桁の下フランジ上面に発生したこぶ状さびであった。また別の 2 カ所は本線に近接するランプ橋に存在したうろこ状さびであった。このうろこ状さびは、本線を車が走行する際に巻き上げられた凍結防止剤が付着したため発生したものと考えられる。残り 4 カ所は中桁に発生したうろこ状さびであり、これらは日当たりや風通しが悪く湿潤環境が長期にわたり保持されたために発生したものと推察された。

3.1.2 さび・被膜厚

Fig. 4 にさび・被膜厚と外観目視評点との関係を示す。Fig. 4 より、外観評点が下がるにつれて、さび・被膜厚が大きくなり、そのばらつきもまた大きくなる傾向を示す。例えば、評点 5 のさび・被膜厚は 46~470 μm の範囲に分布するのに対し、評点 1 のさび・被膜厚は 313~1500 μm 以上の範囲に分布した。ただし、外観評点 1 であるにも関わらず、さび・被膜厚が 600 μm 以下と測定された箇所も存在した。これらの箇所のさび外観を調べてみると、いずれも層状剥離さびが脱落した箇所であることが分かった。このため、外観目視評点 1 であるにも関わらず、さび・被膜厚が薄く測定されたものと思われる。このような層状剥離さびが脱落したと思われる箇所は、今回調査した 78 地点のうち 3 地点存在した (Fig. 4 中、“delamination of rust” の 3 データ)。これら層状剥離さびが脱落したと思われる 3 地点を除くと、さび・被

Fig. 3 Distribution histogram for rank of rust appearance.

Fig. 4 Relationship between rust rank and thickness of rust and coatings.

膜厚と外観目視評点には、外観評点が下がるにつれてさび・被膜厚が厚くなるという相関関係があることが分かった。Fig. 4 より、評点 5, 4 のさび・被膜厚はすべて 600 μm 未満であり、評点 2, 1 のさびは、上記層状剥離さびが脱落したと思われる箇所を除くと約 600 μm 以上であることが分かる。このことから、さび・被膜厚 600 μm が要観察あるいは異常さび形成の目安となることが分かった。この 600 μm のさび・被膜厚は、2004 年度評価基準案においても、正常と要観察とのしきい値とされている。今回実施したさび・被膜厚調査結果においても、2004 年度評価基準案と同様に、600 μm が正常と要観察を分けるさび・被膜厚となることが分かった。そこで、より適切に腐食状況を把握するため、「3.1.1 外観目視結果」記載のさび外観評点について、さび・被膜厚による補正 (さび・被膜厚 600 μm 以上の場合、外観目視評点が 3~5 であっても評点 2 とする) を行うこととした。

3.1.3 イオン透過抵抗値

Fig. 5 にイオン透過抵抗値とさび・被膜厚との関係を示す。イオン透過抵抗値は最小で 0.180 k Ω 、最大で 57.6 M Ω あった。イオン透過抵抗値が異常腐食さび形成の目安となる 3 k Ω ⁶⁾ を下回ったのは 78 地点中 19 地点であり、残りの地点は 3 k Ω を上回った。イオン透過抵抗値が低い地点のさび形態は、評点 2 のうろこ状さびや評点 1 の層状剥離さびである場合が多かった。

Fig. 5 Relationship between ion transfer resistance and thickness of rust and coatings.

Fig. 6 Cross-sectional observation by reflected polarized light and EPMA analysis for the rust of rank-1.

3.1.4 断面観察および EPMA 分析結果

Fig. 6 に外観評点が 1 のコアサンプル断面観察および EPMA 分析結果を示す。偏光顕微鏡で観察した場合、一般に保護性さびは消光し、非保護性さびは偏光して見えるといわれる⁷⁾。Fig. 6 の偏光顕微鏡観察結果より、地鉄界面付近に輝度の高い偏光層 (Fig. 6 中, “bright layer”) が存在しており、非保護性さびの形成が示唆される。また EPMA 分析の Cl 分布図から、この偏光層の箇所において Cl が強く検出されていることが分かる。なお、表面処理剤の成分である P, Si はほとんど検出されておらず、Fig. 6 に示す箇所では表面処理剤が消失していることが分かる。

Fig. 7 に外観評点が 5 のコアサンプル断面観察および EPMA 分析結果を示す。Fig. 7 の偏光顕微鏡観察結果より、地鉄界面に保護性さびの存在を示唆する消光層 (Fig. 7 中, “dark layer”) が生成していることが確認された。また EPMA 分析の P, Si の分布図から、表面処理剤の成分である P, Si が連続して検出されていることが分かる。このことから架設から 30 年以上経過しても、表面処理剤の成分が残存している箇所もあることが判明した。

3.2 自然浸漬電位経時変化

Fig. 8 に 0.1 M Na₂SO₄ 溶液中における各試料の自然浸漬電位の経時変化を示す。耐候性鋼新材を除き、電位は時間の経過とともに徐々に卑化する挙動を示した。耐候性鋼新材の電位は浸漬開始から 45 分後までは上昇し、その後他の試料と同様に卑化する傾向を示した。定常値に達したと思われる 5 時間後の各試料の電位を比較すると、

Fig. 7 Cross-sectional observation by reflected polarized light and EPMA analysis for the rust of rank-5.

貴な方からさび付着材 (−0.57 V) > 耐候性鋼新材 (−0.63 V) = さび落とし材 (−0.63 V) ≒ 普通鋼新材 (−0.64 V) となった。さび付着材以外の 3 種 (普通鋼新材, 耐候性鋼新材, さび落とし材) の安定時の電位はほぼ等しくなることが分かった。鹿島ら⁸⁾ は 32 年間大気曝露された裸仕様耐候性鋼橋梁から切り出したサンプルの電位測定を 0.1 M Na₂SO₄ 溶液で行っており、さび層の保護性評価として、−0.3 V (vs.SCE) 以上の貴な電位を示すさび層は耐候性に優れるとの結果を得ている。今回測定したさび付着材の電位は、浸漬直後の最大値においても −0.4 V (vs.SCE) であり、保護性さび形成の基準となる電位より低かった。これは今回切り出したサンプルが 3.1.1 の外観目視評点で 1 となる層状剥離さびを有しており、保護

Fig. 8 Changes of potential with immersion time for the carbon and weathering steels in 0.1 M Na₂SO₄ solution.

性さびが形成されていなかったためと考えられる。

4. 結 言

架設から 30 年以上が経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食調査を行った。外観目視結果より、調査した 78 地点中 57 地点は評点 3 以上の正常さびと判断された。11 地点で評点 1 の層状剥離さびが生じており、その原因は桁端部における凍結防止剤を含んだ水の漏水に加えて、日当たり、風通しなどの環境条件が重なったことによるものと推察された。さび・被膜厚と外観目視評点には相関があり、外観評点が下がるにつれてさび・被膜厚は大きくなる傾向を示した。今回の調査では、さび・被膜厚 600 μm を正常さびと要観察さびのしきい値とした。EPMA 分析結果より、評点 1 のさびには地鉄との界面に Cl の濃縮が確認され、評点 5 のさびでは地鉄との界面に保護性さびが存在し、表面処理被膜成分が残存していることが判明した。実橋梁から切り出した層状剥離さびを有する耐候性鋼材の電位は、未使用の耐候性鋼材の電位よりも高い値を示すものの、保護性さび形成の基準となる電位よりは低い値となった。

参 考 文 献

- 1) K. Shiotani, W. Tanimoto, C. Maeda, F. Kawabata and K. Amano, *Zairyo-to-Kankyo*, **49**, 67 (2000).
- 2) H. Fujiwara, T. Sugano, M. Aosawa and T. Nagatani, *Zairyo-to-Kankyo*, **49**, 88 (2000).
- 3) M. Yamashita, K. Asami, T. Ishikawa, T. Ohtsuka, H. Tamura and T. Misawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **50**, 521 (2001).
- 4) Independent Administrative Institution Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, Japan Association of Bridge Eng., Japan Iron and Steel Federation, Report on Investigation of Inspection Standard for Unpainted Weathering Steel Bridge (2004).
- 5) Public Work Research Institute -Ministry of Construction, The Kozai Club and Japan Association of Steel Bridge Construction, Report on Application of Weathering Steel to Highway Bridges (XX), No.88 (1993).
- 6) H. Kihira, *Zairyo-to-Kankyo*, **48**, 697 (1999).
- 7) H. Okada, Y. Hosoi, K. Yukawa and H. Naito, *Tetsu-to-Hagane*, **5**, 11 (1969).
- 8) K. Kashima, S. Hara, H. Kishikawa and H. Miyuki, *Zairyo-to-Kankyo*, **49**, 15 (2000).

(Manuscript received October 31, 2011;
in final form February 13, 2012)

要 旨

架設から 30 年以上経過した表面処理仕様耐候性鋼橋梁の腐食を調査するため、外観目視調査、さび・被膜厚測定、イオン透過抵抗測定、偏光顕微鏡による断面観察、EPMA 分析を実施した。外観目視調査では 78 カ所中 57 カ所が正常と判断された。橋梁桁端部の漏水が生じていた箇所において、うろこ状さびや層状剥離さびが観察される場合があった。さび外観評点が下がるにつれて、さび・被膜厚は厚くなる傾向があった。断面観察および EPMA 分析より、異常さびの底面には濃縮した Cl が存在し、正常さびの底面には保護性さびと思われる消光層が存在することが判明した。

キーワード 耐候性鋼橋梁、腐食調査、表面処理、さび・被膜厚、イオン透過抵抗、腐食電位、EPMA