

橋梁用のミニマムメンテナンス実現のための耐候性鋼板と その利用技術

社会インフラ資産を支える

環境調和型ライフサイクルコスト縮減に対応する厚板

Minimum Maintenance Steel Plates and Their Application Technologies for Bridge

—Life-Cycle-Cost Reduction Technologies with Environmental Safeguards for Preserving Social Infrastructure Asset—

鹿毛 勇 KAGE Isamu JFE スチール スチール研究所 耐食・防食研究部 主任研究員(副課長)
松井 和幸 MATSUI Kazuyuki JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(副部長)
川端 文丸 KAWABATA Fumimaru JFE スチール 厚板セクター部 主任部員(部長)

要旨

橋梁のライフサイクルコスト(LCC)を縮減する耐候性鋼の適用範囲を拡大する Ni 系高耐候性鋼と、その耐候性鋼の利用技術である腐食量予測技術およびさび安定化処理の概要を紹介した。JFE スチールでは、高飛来塩分環境においても LCC 縮減可能な Ni 系高耐候性鋼を 2 種類開発した。一つは耐塩分性能を維持しつつ経済性を考慮した 1.5% Ni-0.3% Mo 鋼(JFE-ACL Type1)、もう一つはより高飛来塩分対応の極低 C-2.5% Ni 鋼(JFE-ACL Type2)である。また、橋梁への耐候性鋼の最適な利用支援を目的に膨大な暴露データに基づき、耐候性鋼橋梁の長期腐食量を予測できる腐食量予測技術を開発した。この技術により、橋梁架設地点における最適鋼材の提案が可能となった。橋梁の景観を良好に保つことを目的としたさび安定化処理では、1 回塗りで施工性の優れた「カプテンコート M」を開発・商品化した。さらに、着実かつ早期の保護性さび形成の要望にも対応可能な「イーラス」を製品化している。JFE スチールが提案するこれらのさび安定化処理剤は、環境負荷の大きい Cr や Pb を含有しない環境調和型であり、さらにミル内で前記さび安定化処理を 1 次プライマーとして施すプレコート処理も可能で、施工費の軽減が図れる。

Abstract:

JFE Steel's life cycle cost reduction technologies with environmental safeguard for bridges are reviewed. As for weathering steel, two kinds of advanced steel of Ni type are lined-up for various airborne salt environments. JFE Steel has also developed a new software, which estimates the thickness loss of the weathering steel by atmospheric corrosion for its life time. By using this software, the most suitable weathering steel can be selected for a certain bridge location. The new surface treatment technologies that promote protective rust formation while keeping the good appearance of bridges were also developed. Furthermore, a pre-coat system to reduce the coating cost of bridge was developed.

1. はじめに

現在、鋼橋への耐候性鋼の使用比率は 15% を越えており、10 年前の約 3 倍と急増している¹⁾。この背景として(1)橋梁のライフサイクルコスト(LCC)縮減や少子化による将来の労働力不足の対応としてミニマムメンテナンス実現のための素材が要求されている社会情勢、(2)高飛来塩分環境で適用可能な Ni 系高耐候性鋼の出現および流れ

さびを防止し橋梁の景観を保持するさび安定化処理の活用など耐候性鋼関連技術の進歩²⁾がある。

橋梁への耐候性鋼適用の可否判断において重要な項目は、「架設地における LCC 縮減の効果」や「環境や景観への影響」であり、このような観点から JFE スチールは高飛来塩分対応の Ni 系高耐候性鋼の開発および耐候性鋼の利用技術の拡充を図ってきた。一つは、従来型耐候性鋼(以下、JIS SMA)および Ni 系高耐候性鋼の架設環境における長期腐食量を予測し、経済性を考慮して最適鋼材を提案

する技術であり、もう一つは、耐候性鋼橋梁の景観を良好に保持するために、架設初期の流れ錆を防止し、かつ環境調和性、経済性に優れた新しいさび安定化処理技術である。

本稿では、(1)橋梁用ミニマムメンテナンス厚板である各種耐候性鋼の適用指針と、(2)その利用技術として、最適な耐候性鋼材を選定可能とする腐食量予測ソフト、および、さび安定化処理の特長について述べる。

2. 耐候性鋼適用環境の拡大

はじめに耐候性鋼材を無塗装で使用した場合のLCC低減効果について述べ、次に現状のJIS SMAの適用指針を上回る塩分環境において適用可能なNi系高耐候性鋼の適用環境について検討する。

2.1 耐候性鋼によるLCC低減

耐候性鋼は、生じるさびが緻密で保護性を有するために、時間の経過とともに腐食速度が低下する鋼材である。このため、構造物として長期間無塗装で用いることができ、塗装塗り直しの補修費が低減できる利点を有する。Fig. 1³⁾に橋梁におけるLCC試算例を示す。JIS SMAを適用した橋梁は、数年ごとの塗装補修の必要がなく、塗装橋梁に比べ維持管理費が大幅に縮減できるため経済性に優れている。

しかしながら、保護性が高い耐候性鋼のさびは、高飛来塩分環境では生成しにくく、旧建設省土木研究所、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本橋梁建設協会は、全国41橋の共同調査などから、1993年に無塗装耐候性鋼橋梁の設計・施工要領(改訂案⁴⁾)において、飛来塩分が0.05 mdd (NaCl: mg/dm²/day)以下というJIS SMAの適用指針を提案しさらに、塩分の測定を省略できる地域を離岸距離で設定し、利便性を図っている。

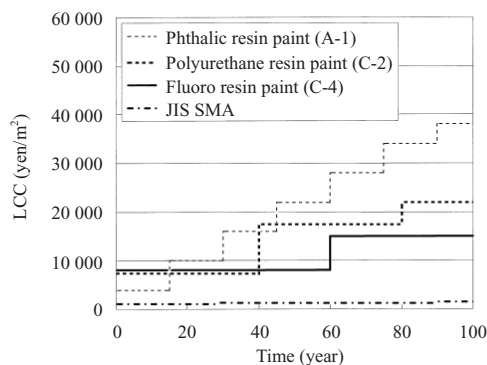


Fig.1 Comparison of life cycle cost (LCC) of bridges with several surface treatment less than 0.05 mdd environment³⁾

2.2 Ni系高耐候性鋼

海岸線が多い日本特有の地形、気候風土に対応すべく当社は従来耐候性に比べ耐塩性を高め、飛来塩分量0.05 mdd以上の地域でも適用できる耐候性鋼として、2種類のNi系高耐候性鋼JFE-ACL Type1⁵⁾、JFE-ACL Type2⁶⁾を開発・商品化した。開発材は、以下の特長を持つ。

- 1) 飛来塩分が多い環境においても優れた耐候性を発揮し、無塗装使用が可能である。
- 2) 初期の流れさびが少なく景観が良好である。
- 3) JIS G 3114 (SMA: 溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材)と同等の機械的性質を有する。
- 4) 炭素量、溶接割れ感受性組成が低く、優れた溶接施工性、溶接継手性能を有する。
- 5) 経済性を考慮しつつ、広範囲の塩分環境に対応可能な商品である。
- 6) 高飛来塩分地域における経済性に優れた橋梁設計を可能とする。

0.05 mddより高い飛来塩分地域におけるNi系高耐候性鋼橋梁のLCC試算例をFig. 2³⁾に示す。Ni系高耐候性鋼を用いることによってJIS SMAが使用できない高飛来塩分地域において経済性に優れた橋梁設計が可能となった。

Table 1にNi系高耐候性鋼の化学組成を示す。1.5% Ni-0.3% Moを基本組成としている標準型のJFE-ACL Type1は、Ni量を抑えMoを添加することにより、耐候性を確保しつつ経済性に優れたことを特長としている。Niは高飛来塩分環境においても緻密なさび層を形成し物理的に塩化物イオンの透過を抑制する効果を発揮する。MoはMoO₄²⁻イオンの持つカチオン選択透過性により塩化物イオンを透過し難くする効果を発揮する。一方、極低C-2.5% Ni鋼を基本組成としている高塩分環境型のJFE-ACL Type2は、Ni添加量が高めることにより高い耐候性を発揮する。さらに Fig. 3⁶⁾にアークストライク溶接条件(JIS Z 3115)で行った最高硬さ試験(JIS Z 3101)結果を示す。極低C化により、ピッカース硬さで275と十分低く

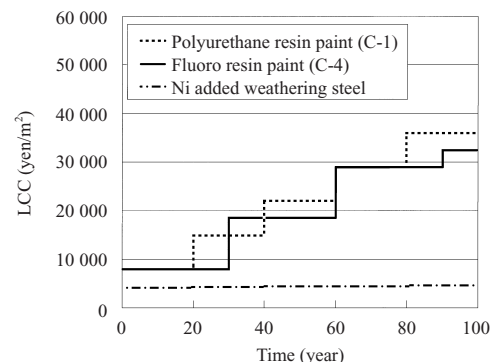


Fig.2 Comparison of life cycle cost (LCC) of bridges with several surface treatment more than 0.05 mdd environment³⁾

Table 1 Chemical compositions of Ni added weathering steels

Steel	Thick-ness (mm)	Chemical composition (mass%)										Mechanical properties				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	C_{eq}^{*1}	P_{CM}^{*2}	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI (%)	$\sqrt{E_0}^{*3}$, $\sqrt{E_{-5}}^{*4}$ (J)	$\sqrt{T_S}$ (°C)
JFE-ACL400 Type1	12	0.04	0.30	0.57	0.032	0.003	-	1.42	0.30	0.27	0.13	291	460	34	373	-59
JFE-ACL490 Type1	50	0.07	0.32	0.71	0.033	0.002	-	1.45	0.32	0.33	0.16	358	515	38	281	-43
JFE-ACL570 Type1	75	0.07	0.26	0.74	0.029	0.004	-	1.48	0.31	0.32	0.16	532	625	32	270	-50
JFE-ACL400 Type2	50	0.02	0.27	0.32	0.011	0.003	0.37	2.60	-	0.15	0.10	355	460	40	355	-35
JFE-ACL490 Type2	50	0.02	0.29	0.92	0.006	0.005	0.37	2.68	-	0.26	0.14	445	528	39	388	≦-80
JFE-ACL570 Type2	50	0.02	0.34	0.98	0.013	0.002	0.39	2.61	-	0.27	0.14	523	637	32	390	≦-80

*¹ $C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$, *² $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + 60Ni + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$,

*³ ACL400 Type1, ACL490 Type1, ACL400 Type2, ACL400 Type2, ACL490 Type2, *⁴ ACL570 Type1, ACL570 Type2

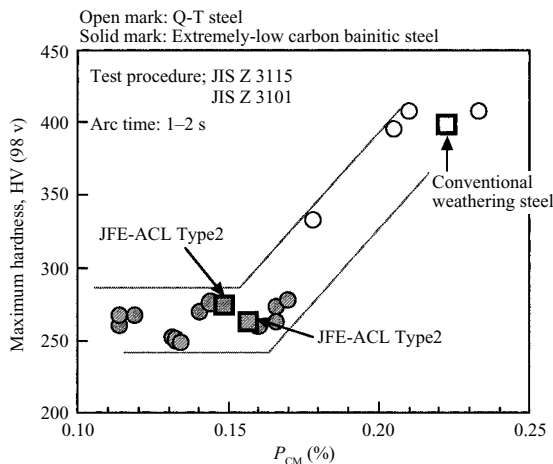


Fig. 3 Relation between P_{CM} and maximum HAZ hardness of 570 MPa grade weathering steel subjected to arc strike welding⁵⁾

優れた溶接性を有する。

このように Ni 系高耐候性鋼は、JIS SMA の適用範囲 (≦0.05 mdd) を超える高い飛来塩分環境で適用可能であるが、その適用基準に関してはまだ明確に設定されていない。無塗装耐候性鋼の適用可否は、「100 年の推定片側板厚減少量が 0.5 mm 以下」が目安となっており⁷⁾、これを超える状態では層状剥離さびの発生により急激に板厚減少が生じるため、耐候性鋼の使用は適さないと考えられている。100 年の暴露試験結果を得てから供することは事実上不可能であるが、安定化挙動をともなった耐候性鋼の腐食量予測を行うのに、堀川らが提唱⁸⁾した式(1)が広く用いられている⁹⁾。

$$Y = A \cdot X^B \quad [1]$$

X: 暴露期間(年)

Y: 片側平均板厚減少量(mm)

A B: 環境、鋼種成分によって変化する係数
べき数

一般に、無塗装耐候性鋼橋梁は、鋼材表面に付着した塩

分が降雨によって洗い流されない部位で最も腐食が激しい。このような最も厳しい部位の腐食挙動を把握するために、当社では、全国各地で橋梁の内桁、あるいは覆い付きの暴露架台を用いて水平置き暴露試験を行っている。銹子(約 0.37 mdd)、宮古島(約 0.46 mdd)などの全国各地の暴露試験結果ならびに温度、湿度、塩分の影響を考慮した腐食試験結果より、当社の Ni 系高耐候性鋼 (JFE-ACL Type1, JFE-ACL Type2) の 100 年後の板厚減少量を式(1)に基づき推定し、鋼材の耐飛来塩分能力の目安を求めた。その結果を Fig. 4 に示す。これより飛来塩分量が 0.4 mdd 以下の場合には JFE-ACL Type1, 0.6 mdd 以下の場合には JFE-ACL Type2 が適用可能と判断できる。また、実際の適用にあたっては、架設地における腐食環境をより精度良く判断するために(1) 架設環境調査 (2) 近傍の橋梁調査を行って総合的に判断する必要がある。

なお、海塩量と離岸距離との間には式(2)⁴⁾の傾向が認められている。

$$C = C_1 \cdot r^{-0.6} \quad [2]$$

C: 飛来塩分量 (mdd)

C_1 : 距離 1 km の飛来塩分に相当する量

r: 離岸距離 (km)

式(2)によると、0.4 mdd 以下である地域は、JIS SMA 適

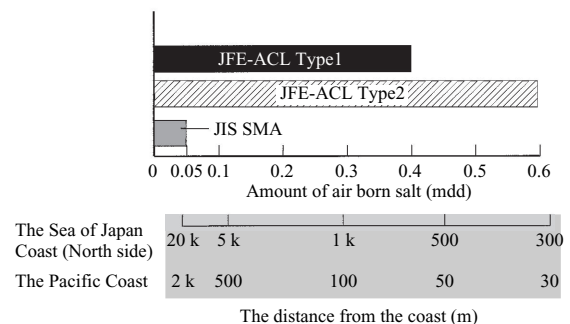


Fig. 4 Applicable area of Ni added weathering steels for coastal use

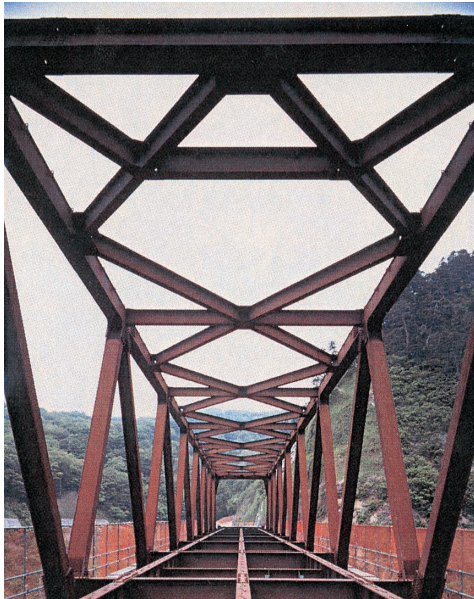


Photo 1 Appearance of Shigemisawa-bashi Bridge made of Ni added weathering steel (JFE-ACL Type1)



Photo 2 Appearance of Shinkouji-oohashi Bridge made of Ni added weathering steel (JFE-ACL Type2)

用不可地域 (0.05 mdd 以上) の 95% 以上の面積を占めることが導かれる。

Photo 1 に JFE-ACL Type1 を用いた橋梁の例としてシゲミ沢橋 (1999 年度架設, 新潟県岩船郡朝日村, 離岸距離: 約 20 km) の外観を Photo 2 に JFE-ACL Type2 を用いた橋梁の例として, 真光寺大橋 (2000 年度架設 新潟県佐渡市, 離岸距離: 約 2-3 km) の外観を示す。いずれも良好な外観を呈している。

3. 耐候性鋼の利用技術

耐候性鋼をさらに安心して使用するためには, さびの生成挙動をあらかじめ把握することが重要である。最近では LCC 評価が重視されるとともに, これまでの暴露試験結果をもとに, 腐食量を予測することが試みられている¹⁰⁾。ここでは, 当社が開発した (1) 長期の腐食量を予測する技術と (2) 緻密な保護性さびを形成しつつ良好な景観を保つさび安定化処理技術について紹介する。

3.1 耐候性鋼の腐食量予測ソフト

架設環境において最も LCC の縮減可能な防食法を簡便に見出し, 橋梁構造物の設計に速やかに反映することが重要である。この要求に応える手法として, 2.2 節で紹介した腐食試験結果を用いて全国の任意の橋梁架設地点における耐候性鋼の腐食量を算出するソフトウェアを開発した。以下にその概要を述べる。

本ソフトウェアは腐食試験結果に気温, 湿度, 飛来塩分の影響を反映しており, これらの環境変数から, 腐食量を算出することを可能としている。本ソフトウェアでは, 全国各地の各環境変数¹¹⁾ をデータベースとして用いており, 橋梁架設地を設定することでその地域に適合する環境変数の値を簡便に設定することができる。

腐食量の経年変化を推定する流れを Fig. 5 に示す。はじめに橋梁を架設する場所を設定する。この架設地の温度, 湿度は, 全国約 160 ヶ所の気象官署のなかで架設地に最近接する場所の平年値が採用される。飛来塩分量 (C) は架設地の実測値を直接入力するかまたは, 飛来塩分の測定値がない場合などは, 架設地の離岸距離を入力することにより前出した式 (2) を用いて算出することも可能である。この飛来塩分に基づいて, 耐候性鋼の腐食量を予測する。さらに, 本手法による予測腐食量と実際の腐食量の差については, 実橋梁における腐食データを解析してそのばらつき (σ) を求め, 予測結果に反映させることにより実際の適用における信頼性の向上を図っている。

ソフトウェアでは, 長期の腐食量変化を比較し材料選定を簡便に行うため, 架設地における JIS SMA, Ni 系高耐候性鋼 (JFE-ACL Type1, JFE-ACL Type2) の腐食量の経

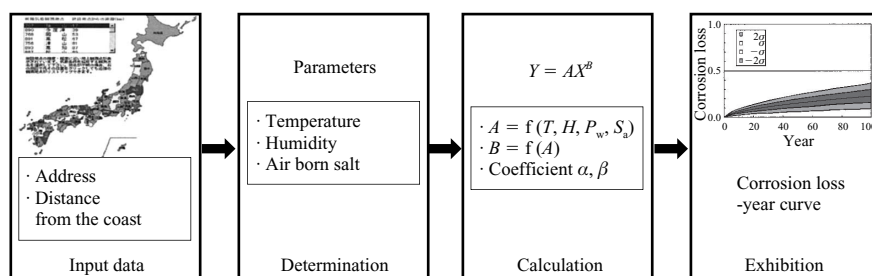


Fig. 5 Flow chart of JFE Steel's corrosion estimation system

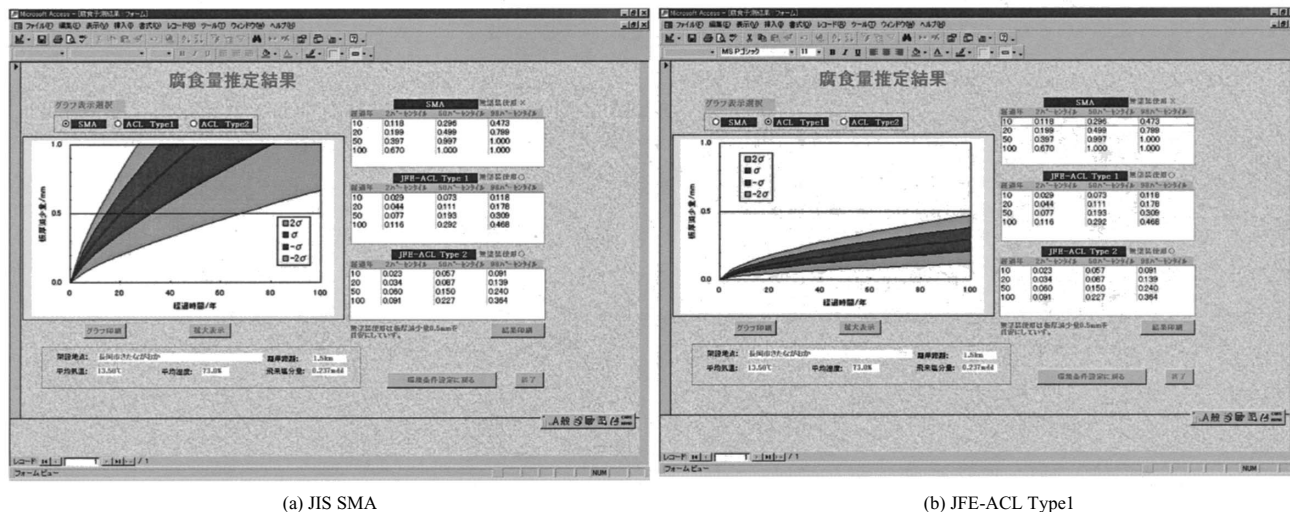


Fig.6 Calculated curve obtained by JFE Steel's corrosion estimation system

年変化とそのばらつき範囲および100年後の予測腐食量を表示する。Fig. 6に高飛来塩分環境におけるJIS SMAおよびJFE-ACL Type1の計算例を示す。このソフトウェアにより、任意の架設地における長期腐食量を簡便に予測し、腐食量のばらつきを考慮した最適なLCC低減に寄与する鋼材の提案も可能となった。

3.2 環境調和型さび安定化処理

さび安定化処理は、耐候性鋼の保護性さびが形成されるまでの期間、流れさびの発生やさび色調による外観変化を防止する塗り直し不用の表面処理であり、最終的には処理膜は風化消失し、耐候性鋼本来の保護性さびに置き換わる点で通常の防食塗料と異なる。鋼橋技術研究会の2002年の調査¹²⁾によれば、さび安定化処理は全耐候性鋼橋梁の44%で採用されており、耐候性鋼の都市部への採用拡大にともない、今後もその採用が増加すると考えられる。

当社では、(1)環境にやさしい：処理膜中に環境負荷の大きいCr、Pbなどを含有しない、(2)施工が簡単である：一般の橋梁用塗料と同様の施工が可能、(3)プレコート対応：お客様での製品プラスト工程の簡略化が可能などの当社独自の特長を兼ね備えた新しいさび安定化処理剤「カプテンコートM¹³⁾」「イーラス¹⁴⁾」を開発・商品化している。当社では、要求性能を満足し、かつ施工性・経済性に優れた実績が多い「カプテンコートM」をさび安定化処理剤として推奨している。また、着実かつ早期の保護性さび形成の要望がある場合には「イーラス」を推奨している。

また、Ni系高耐候性鋼にこれらの処理剤を塗布することにより、高飛来塩分環境に適用した場合でも、流れさびやさび色調変化による外観ムラの発生を防止することができる。以下にこれらのさび安定化処理の特長について述べる。

3.2.1 カプテンコートM

カプテンコートMは、700件以上の実橋適用および20

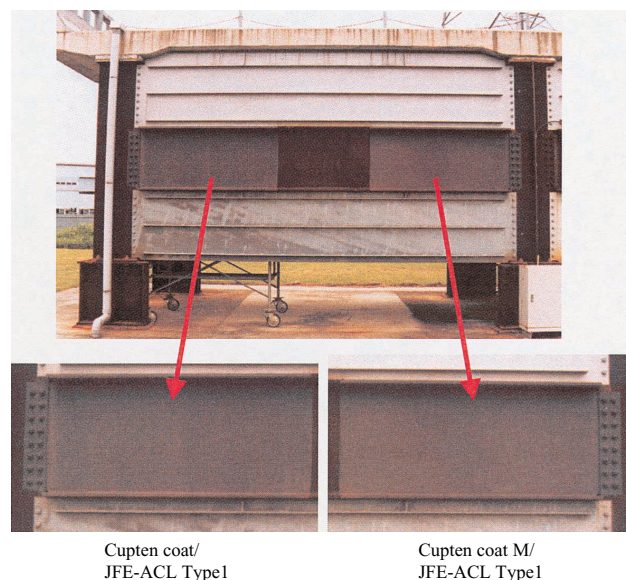


Photo 3 Appearance of mock-up bridge treated by Cupten coat and Cupten coat M after 3 year-exposure in coastal area

年以上の暴露において良好な外観保持性、保護性さび形成機能の実績を有するカプテンコート(2層型¹⁵⁾の知見を元に開発された、施工性に優れた単層の処理剤である。

Photo 3にカプテンコートMの暴露外観を示す。カプテンコートMは20年以上の実績があるカプテンコートと同様に流れさびが発生しておらず、色調および表面状態など良好な暴露外観を呈する。さらに、20年間暴露したカプテンコートにおいて、処理膜除去後に緻密な保護性さびが形成されていたこと¹⁶⁾より、同様の防食メカニズムを採用しているカプテンコートMにおいても長期暴露により健全な処理膜下で緻密な保護性さびが形成すると考える。

3.2.2 イーラス

イーラスは、処理膜中に保護性さびの核となる人工微細さびを添加し、さらに処理膜の水および酸素の透過性を高

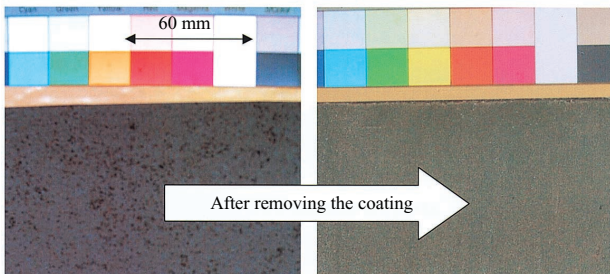


Photo 4 Appearance of mock-up bridge treated by e-RUS and rust outflow on plaster board after 3 year-exposure in coastal area

めることにより、確実かつ早期に保護性さびを形成する処理剤である。これらにより保護性さびが数年で形成され暴露初期に発生する流れさびや部分的なさび形成による外観不良が防止される。

Photo 4 にイーラスの暴露外観を示す。橋梁模擬体下に設置した石膏板には流れさびの跡は見られず、暴露外観においても良好な色調および表面状態で推移している。暴露3年後にこの処理膜を強制的に塗膜剥離剤で除去して確認したところ、処理膜下全面に緻密な保護性さびが形成されており、さらに処理膜剥離後も流れさび発生を抑制した。

3.2.3 プレコート処理システム

カプテンコート M、イーラスともに加工後の工場塗装や現場塗装に加えて、鋼板出荷前の厚板工場において実施する「プレコート処理」に対応しているのも大きな特徴である。Fig. 7 にプレコート処理の工程を示す。既存の1次

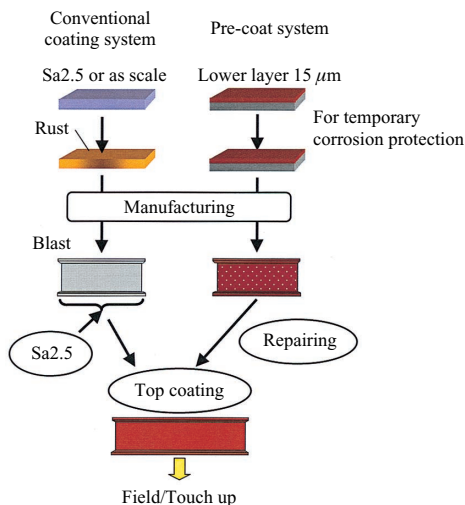


Fig. 7 Pre-coat system of new surface treatment

プライマー処理と同様に薄膜でさび安定化処理がなされた「プレコート」耐候性鋼材は、保管中の一次防錆作用により作業現場を汚すことなく、簡易な素地調整で最終塗装が可能となる。Fig. 8 に工場塗装における施工費構成の一例を示す。施工費の中で素地調整費の占める割合は大きく、製品プラスト工程が簡略化できるプレコート処理システムの適用により、施工コストを縮減する効果が期待できる。

Photo 5 6 にカプテンコート M およびイーラスのプレコート処理鋼材を適用した橋梁を示す。LCC 削減および施工費縮減が期待できるプレコート処理システムの採用が、今後さらに増加すると考えられる。

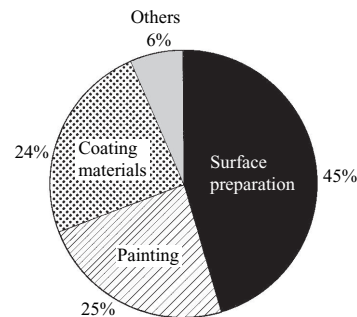


Fig. 8 Example of cost composition for conventional coating system



Photo 5 Appearance of World-cup-kyo Bridge applied with Cupten coat M treatment and pre-coat system (Yokohama City)



Photo 6 Appearance of Maruyama-bashi Bridge applied with e-RUS treatment and pre-coat system (Okaya City)

4. おわりに

橋梁用耐候性鋼材およびその利用技術について述べた。Ni系高耐候性鋼は耐塩分特性に優れ、JIS SMA が採用できなかった 0.05 mdd を超える高飛来塩分環境において耐候性能を呈し LCC 削減が期待される。また、腐食寿命予測技術を利用したソフトウェアにより、橋梁設計時に架設地に最適な耐候性鋼材を選定することができる。さらに耐候性鋼橋梁の景観を美しく維持する JFE スチールのさび安定化処理は、いずれも環境調和型であり、プレコート処理システムとの併用によって施工費縮減を可能としている。公共事業費の削減、LCC 重視の流れの中で耐候性鋼の果たす役割はますます大きくなりつつある。本開発が橋梁分野のみならず他分野においても耐候性鋼の適用拡大に寄与するものと考えている。

参考文献

1. 日本橋梁建設協会．新しい鋼橋の誕生 II ．2003
2. 耐候性鋼技術小委員会腐食防食協会技術委員会．耐候性鋼とさび層の現状と課題
3. 日本橋梁建設協会製作研究委員会．鋼橋の防錆・防食特集(虹橋 62 号 63 号より抜粋)．2000
4. 建設省土木研究所ほか．耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書 (XX) ．1993
5. 竹村誠洋，藤田栄，鈴木伸一，松井和幸．海岸耐候性鋼．NKK 技報 no. 171，2000，p. 913

6. 塩谷和彦，川端文丸，天野虎一．溶接性に優れた極低炭素ベイナイト型新耐候性鋼．川崎製鉄技報．vol. 33，no. 2，2001，p. 39-43
7. 加納勇，渡辺祐一．橋梁用新耐候性鋼．土木学会誌．vol. 87，no. 4 2002，p. 58
8. 堀川一男，滝口周一郎，石津義雄，金指元計．各種金属材料および防錆被服の大気腐食に関する研究(第 5 報)金属素材類暴露 5 年の結果．防食技術．vol. 16，no. 4，1967，p. 153
9. 西川和廣，村越潤，田中良樹．無塗装鋼材の大気腐食性状 耐候性鋼材の全国暴露試験結果．土木技術資料．vol. 36，no. 8，1994 p. 60-67.
10. 紀平寛．半永久耐候性鋼橋梁設計への腐食減耗予測ソフトウェア開発．新日鉄技報．no. 377，2002
11. 気象庁編．気象庁年報．2001
12. 鋼橋技術研究会施工部会報告書 IV ．2002
13. 宮田志郎，竹村誠洋，古田彰彦，森田健治，松井和幸．耐候性鋼のさび安定化処理剤「カプテンコート M」．NKK 技報．no. 171，2000 p. 14-20
14. 小森務，京野一章，加藤千昭．耐流れ錆性および色調安定性に優れた耐候性鋼用表面処理剤「イラス(e-RUS)」．川崎製鉄技報 vol. 35，no. 3，2003，p. 38-43
15. 府賀豊文，村尾篤彦，武田孝，松島巖．塗装工学．vol. 18，1983，p. 264
16. 耐候性鋼材暴露試験 20 年暴露試験最終結果．電力中央研究所報告．2002



鹿毛 勇



松井 和幸



川端 文丸