

# 耐候性鋼橋梁の防食リスクマネジメント技術の開発

## Corrosion Risk Management Methods to Realize Long-term Durability of Weathering Steel Bridges

藤井 康盛<sup>\* (1)</sup>  
Yasumori FUJII

田中 睦人<sup>\* (2)</sup>  
Mutsuto TANAKA

紀平 寛<sup>\* (3)</sup>  
Hiroshi KIHIRA

松岡 和巳<sup>\* (4)</sup>  
Kazumi MATSUOKA

### 抄 録

耐候性鋼材は、塗装塗替え等の維持管理の軽減への期待から橋梁への採用が増え、新しい鋼材等の開発で適用可能性が拡大している。耐候性鋼材による防食法の長期耐久性の実現には、鋼材性能に応じた適切な環境での使用、予期せぬ環境悪化に備えた適切な維持管理が必要である。耐候性鋼橋梁の最小保全に資する適用性評価から診断補修までの防食リスクマネジメント技術について紹介した。

### Abstract

In expectation to reduction of maintenance cost due to repainting, the application of weathering steels to bridges is increasing. Applicability limit is enlarged by recently developed nickel containing advanced weathering steels. In order to realize long term durability of weathering steel bridges, one has to assess at planning and/or designing stages, that atmospheric corrosiveness of the construction site is within the applicability limit of the weathering steel to be applied. Also, adequate maintenance is required to cope with unpredictable part in corrosion risks. In this report, a corrosion risk management technologies developed by the authors are systematically proposed in terms of methods for selection of adequate weathering steels, methods for monitoring and diagnosing rust state of existing bridges, together with an efficient and effective methods for repair as a contingency plan.

## 1. 緒 言

無塗装で使用できる耐候性鋼材は、長期間供用される鋼構造物の防食のライフサイクルコスト(LCC)低減の観点で魅力的な材料である。我が国の耐候性鋼材需要の約75%が橋梁用途であり、主に耐候性鋼材の使用により防食を施した橋を耐候性鋼橋梁と呼ぶが、図1に示すように鋼橋における比率は一貫して増加傾向を示す。

耐候性鋼材の橋梁への適用の考え方と規定<sup>1)</sup>は、実適用と平行し順次整備され、道路橋示方書2002年改定<sup>2)</sup>にて鋼橋の防食法の一つに位置付けられた。一方、既設橋の中には現行規定に照らすと適用

困難な地域に設置されている橋や凍結防止剤散布の影響が懸念される橋がある。また、耐候性鋼橋梁の適用可能性を広げる新しい鋼材や表面処理の適用に関する共通の指針が未整備であった。これらの課題解決に向けて、橋梁技術と耐候性鋼材に関わる行政、大学、産業界の技術者が協力して、現行の適用規定の再評価と改良、点検診断・補修技術の整備と充実、および、新技術採用のための性能規定型設計体系に準じた適用評価方法の整備に取り組んでいる<sup>3,5)</sup>。

本報告ではこれらに関連し耐候性鋼橋梁の最小保全に資する適用性評価から診断、補修までの防食リスクマネジメント技術を紹介する。

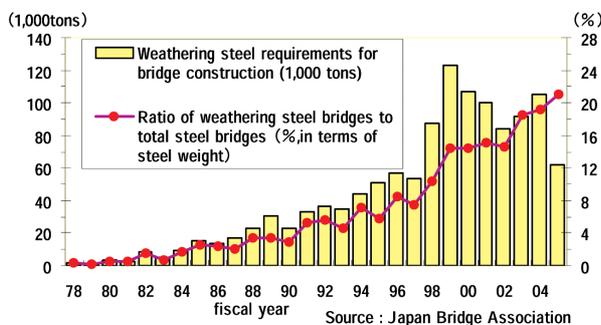


図1 耐候性鋼橋梁の国内建設量の推移  
Increasing applications of weathering steel bridges

## 2. 耐候性鋼材による防食設計の考え方

耐候性鋼材は、適当な環境条件で表面に緻密なさび層(保護性さび)を生成し、これが腐食を次第に抑制する特性がある。さびの状態は、腐食環境の厳しさに依存して変化し、大気中の塩分量が多い環境や鋼材表面に湿潤状態が継続する環境では腐食が進行するので注意を要す。さびの状態と腐食減耗の関係の概念<sup>5,6)</sup>を図2に示す。

耐候性鋼材は、腐食進行が完全に停止するわけではないが、特別な維持管理を要さない程度に腐食速度が十分に低減する状態(さび安定化)となり、設計供用期間の腐食減耗量を予め想定される範囲内に抑制することで耐久性が実現される。耐候性鋼材はメンテナ

\* (1) 建材開発技術部 橋梁開発技術グループ グループリーダー  
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7780

\* (2) 厚板営業部 厚板商品技術グループ マネジャー

\* (3) 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員

\* (4) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員

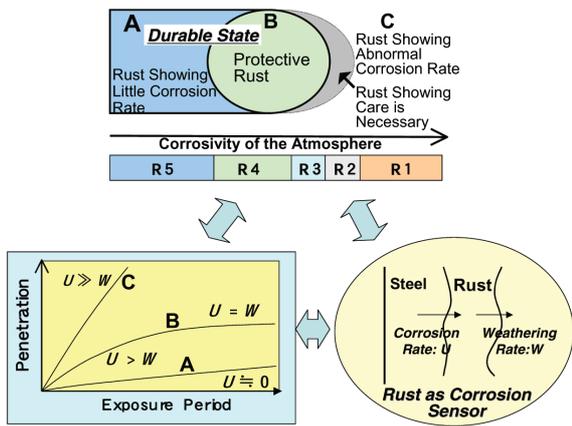


図2 さびの状態と腐食減耗の関係の概念

Relationship among durable state concept, rust appearances, and penetration curves of weathering steels

表1 耐候性鋼橋梁の耐腐食性能レベル  
Levels of anti-corrosion design for weathering steel bridges

I	The level in which corrosion loss to occur during design service period little affect designed load capacity of a bridge. Target: thinning per side is less than equal 0.5mm/100years. Rust appearance rate is to be kept from 3 to 5.
II	The level in which corrosion loss to occur during design service period little affect designed load capacity of a bridge, with setting of corrosion margin. Target: thinning per side is less than equal 1mm/100years. Rust appearance rate is to be kept more than 2.
III	The level applicable to exchangable parts of a bridge. Rust appearance rate is to be kept more than 1.

スフリーではなく、所期の防食性能の発揮には橋梁の構造計画、設計、施工、維持管理の各段階での適切な措置や配慮が必要である。

防食の要求性能は、表1に示す耐腐食性能が考えられるが、一般的にはレベルIが目標となる<sup>9)</sup>。ここで片面平均0.5mm/100年以下という目標は、確実にさび安定化の状態が維持でき、橋梁の耐荷力に影響を及ぼさない範囲として設定されている。

### 3. 耐候性鋼橋梁の防食リスク管理

今後国内で建設される橋梁については、一般的な条件であれば設

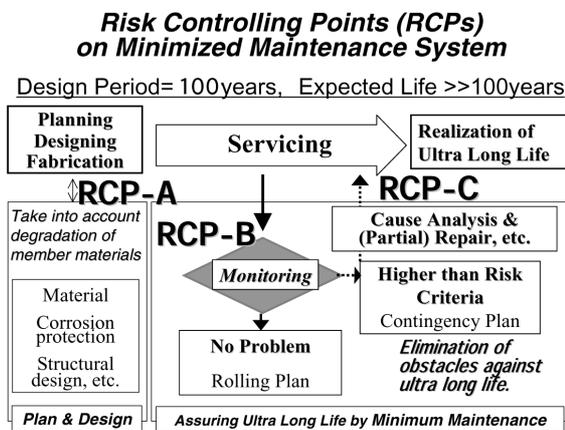


図3 防食リスク管理のポイント

Minimum maintenance bridge concept and controlling points for corrosion risks

計供用期間は100年が目安である。一方、実橋では想定より厳しい環境に曝されたり、構造的な劣化部位からの漏水で局部的に悪化する場合等、耐候性鋼材の異常腐食を生ずるリスクがある。LCC低減には最小保全による長期耐久性の実現が目標となるが、防食のリスクを想定し、これを監視し低減する管理手法が有効と考える。図3に防食リスク管理の要点を示すが、計画設計段階では架橋環境の腐食性に応じた最適な鋼材選定と維持管理を容易にする防食構造設計、供用段階ではさび状態のモニタリングと異常の早期検知、異常発生時には原因の究明と適切な部分補修の実施が挙げられる<sup>7)</sup>。

### 4. 耐候性鋼材の性能に応じた適切な環境での使用に関わる技術

#### 4.1 新しい耐候性鋼材と性能評価

国内橋梁では構造材に使用される耐候性鋼材としてJIS G 3114規格(SMA)の無塗装用(SMA-W)が一般に使用されているが、その適用は飛来塩分量が少ない地域(0.05mdd以下)に制限されているため、耐塩害性に優れた耐候性鋼材の開発が望まれていた。

新日本製鐵では、ニッケル増量添加が耐塩害性を高めることに着目し、1998年に3%ニッケル高耐候性鋼<sup>®)</sup>を溶接材料、高力ボルトとともに製品化し、2006年度までの適用累計は24.5千トンに達する。

成分系の異なる鋼材の耐候性能は、適切な促進試験や架橋環境を反映した曝露試験により評価するが、図4は曝露試験での比較例である。ここで、耐候性合金指標Vは、鋼材の耐候性に及ぼす合金元素の影響を元素ごとに検討して定めようとする指標である<sup>9)</sup>。SMA-WのV値1.00程度に対し、3%ニッケル高耐候性鋼は1.50を確保している。これらの中鋼種としてV値1.20の鋼材も開発・製造中である。

#### 4.2 適用環境の評価方法

耐候性鋼橋梁の適用可否は、架橋環境の評価による耐候性鋼材の腐食減耗量の予測に基づく検討が基本となる。橋の各部の腐食に影響を及ぼす塩分や湿気の程度は、架橋地点の地域特性、地形と橋との関係、部位・部材固有の局部的な環境によって異なる。

構造計画で橋全体に影響を及ぼす地域環境を評価するが、SMAに関するこれまでの飛来塩分量を適用可否判定の指標とする方法は、全国41橋の床版下桁内側下部の環境における曝露試験と飛来塩分量測定(側方遮蔽条件)の結果に基づいている<sup>10)</sup>。計画段階で飛来塩分量測定を行う場合は一般的に側方が開放された条件で行う場合が多いと思われるが、側方が遮蔽された条件に比べ大きめの評価とな

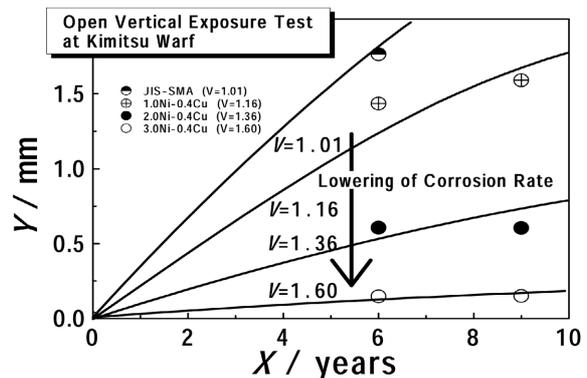


図4 曝露試験による各種鋼材の耐候性能の比較  
Exposure test results for various weathering steels

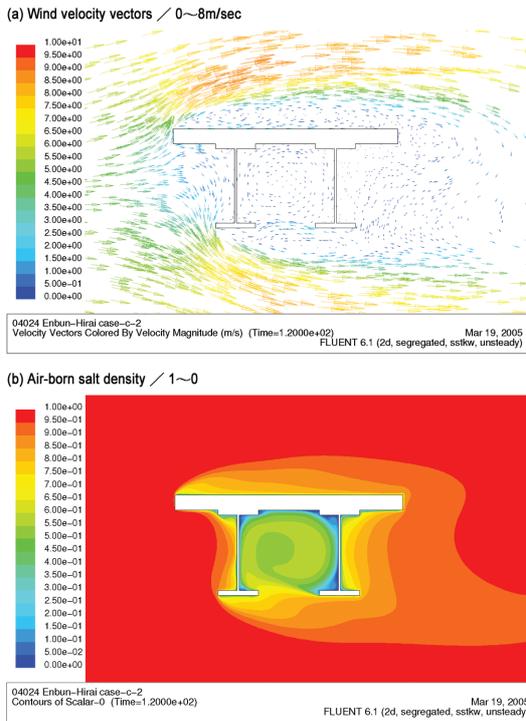


図5 橋梁断面周りの風速，飛来塩分濃度分布解析の例  
Simulated distribution of wind and air-born salt around a plate girder bridge

る。図5は橋桁周りの風速，飛来塩分濃度分布の解析として，曝露試験用のI断面の模擬橋梁の例を示す。ガーゼ法による飛来塩分量測定値でも桁内は桁外に対し小さいことが確認されている<sup>11)</sup>。I断面は桁内側下フランジ上面に飛来塩分や結露水の滞留を生じやすいが，断面を船型や鋼管とすると滞りが抑制され防食上は有利である<sup>12)</sup>。

飛来塩分を環境の評価指標として用いる際には，測定の場所と方向による差異，時期による変動に注意を要する。簡易で精度の良い現地環境評価方法として開発，実用化を進めている技術を次節で紹介する。なお，桁端部等の局部環境は，計画・設計段階での予測が難しいことから，部分塗装を施すなど，細部構造を適切に選定することが望ましい。

### 4.3 耐候性鋼材の腐食減耗予測方法

新日本製鐵は，耐候性鋼のさび安定化概念に基づく腐食減耗予測計算方法を体系的に検討し，腐食速度パラメータを推定するアルゴリズムや数式モデルの立案した<sup>13)</sup>。さらに，地域気象データベース化，簡易な飛来塩分量および硫酸化物量の推定法を構築し，図6に示すシミュレーションソフトウェアYOSOKU®を開発した。

耐候性鋼材SMAの経年腐食減耗量 $Y$ (mm)は，式(1)で示されるこ

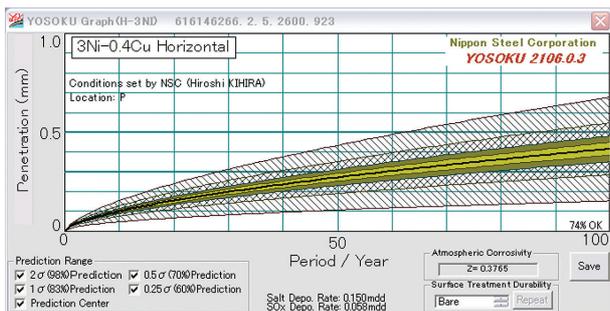


図6 腐食減耗予測シミュレーションソフトウェア  
Corrosion prediction software, called YOSOKU®

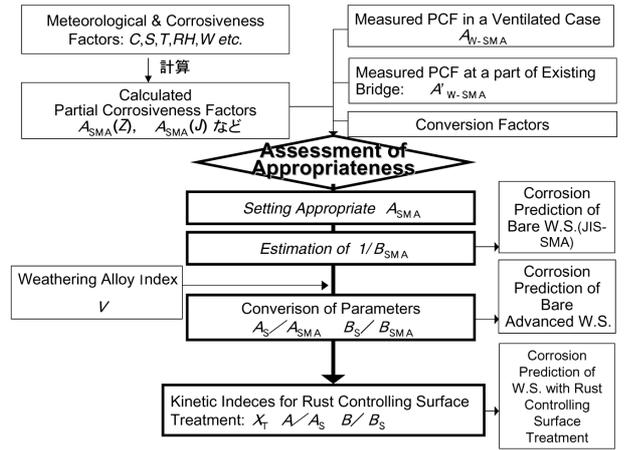


図7 耐候性鋼材の腐食減耗予測計算フロー図  
Assessment and computational flow of corrosion prediction

とが知られている。

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

ここで， $X$ は曝露開始からの経過年数， $A_{SMA}$ および $B_{SMA}$ は曝露環境および合金成分から決まる腐食速度パラメータである。

$A_{SMA}$ 値は， $X = 1$  (年)とおいたときの腐食減耗量 $Y$ 値に相当し，SMAが曝露されたその局部の環境の腐食性を定量的に示す指標を意味するので，局部環境腐食性指標と呼ぶ。一方， $B_{SMA}$ 値は，さびの保護性の上昇に伴う腐食速度低減の度合いの逆数に相当することから， $1/B_{SMA}$ 値は保護性さび形成効果指数と呼ぶ。SMAに関する前述の曝露試験データを元に $A_{SMA}$ と $B_{SMA}$ の関係を定式化すると， $A_{SMA}$ 値から図7に示すフローにて腐食減耗量を計算できる<sup>5,13)</sup>。

検討対象となる曝露試験が行われた桁内側下部は雨がかりがなく腐食環境として厳しい傾向にあり，代表部位として取り扱う。

ニッケル系高耐候性鋼の場合は，腐食速度パラメータを $A_S$ ， $B_S$ とおき，SMAの $A_{SMA}$ ， $B_{SMA}$ とのそれぞれ比を任意の耐候性合金指標( $V$ 値)と関連付ける変換方法を用いて， $A_{SMA}$ 値 $\rightarrow B_{SMA}$ 値 $\rightarrow A_S$ 値と $B_S$ 値という手順で腐食速度パラメータの変換を行う。

耐候性鋼材の表面に施されるさび安定化補助処理は，保護性さび形成補助と初期さび汁流出抑制を基本機能とし，母材を裸で適用可能な環境で用いるのが原則である。付加機能として腐食進行を制御する機能が実証されている場合には，腐食減耗量の予測をして耐腐食性レベルI達成の見込みが得られることを前提に，裸使用の限界を超えて，その適用が可能となることがある。

### 4.4 短期曝露試験による現地適用性評価方法

適用環境条件を反映した曝露試験は，直接腐食量を評価でき精度の面で優れているが，複数年のデータを必要とした。腐食減耗予測方法を応用し，曝露試験1年目腐食減耗量を架橋地点の環境腐食性指標 $A_{SMA}$ として評価し，これを耐腐食性能レベルに対応したしきい値と対比して適用可否を判定する評価方法が開発された<sup>5)</sup>。曝露試験は建設予定地の覆い付き架台もしくは近隣既設橋梁で行い，実測値を橋梁代表部位の腐食環境指標として補正して評価する。耐腐食性能レベルIに対応するしきい値は0.030mmとされている<sup>5)</sup>。

### 4.5 耐候性鋼材の選定方法

局部環境腐食性指標 $A_{SMA}$ が定まると任意の耐候性合金指標 $V$ の耐候性鋼材について100年後の予測腐食減耗量 $Y(X=100)$ を計算できる。図8に示す $A_{SMA}-V-Y$ の関係図を用いると適用環境の腐食性に対して防食の要求性能に適合する鋼材の選定や，設計で考慮すべき

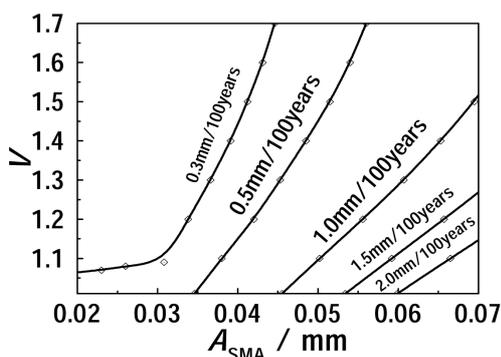


図8 各種耐候性鋼材の腐食減耗予測図  
Corrosion prediction chart for various weathering steels

腐食減耗量を検討することができる<sup>5,14)</sup>。

腐食予測では曝露試験における環境因子測定値のばらつきに起因する誤差を考慮して平均腐食量を確率統計的に計算するが、ここでは正規確率50%の予測腐食減耗量の計算値を用いて表示している。

### 5. 予期せぬ環境悪化に備えた適切な維持管理に関する技術

#### 5.1 防食リスクマトリックス

維持管理においては、耐候性鋼材の状態が計画・設計段階に想定した腐食速度内にあれば許容リスク内であり正常、許容リスク限界に近ければ要観察、許容リスク限界上であれば異常と整理して防食のリスク管理を行うことが有効と考える。

腐食損傷の発生確率と仮に起きた場合の重大性を総合した指標をリスク指標とする。複数の管理すべき橋に対してリスク指標の評価に基づき損傷回避への対応策に適正な優先順位を検討できるように、標記体系として図9の防食リスクマトリックスを提案している<sup>7)</sup>。

LCCの観点では異常の発生がすなわち失敗というわけではなく、異常を早期に発見し適切な原因排除措置か追加防食措置を施して損傷を回避すればLCC低減の価値は得られる。

#### 5.2 さびの状態のモニタリングに関わる技術

耐候性鋼材のさびの状態は、さびの外観評点付け法により推定できる。ただし、この方法は目視検査であるため検査者の経験が浅い場合は難しいと報告されおり、誤診リスクを低減するために図10に

State	Rank	Scale in Structure / Measure			
		(a) Micro	(b) Minor	(c) Local	(d) Entire
Normal (I)	A	Risk Navigation			
	B				
	5	Rolling Plan (Do periodical inspection as initially planned.)			
	4	Risk Positioning			
Care (II)	3	Cause analysis, elimination of cause, intensified inspection, are needed.			
Critical (III)	2	Cause analysis, revised maintenance plan are needed. Depending on diagnosis, additional anti-corrosion measure such as repair painting may be necessary.			
	1	Cause analysis, revised maintenance plan are needed. Depending on diagnosis, additional anti-corrosion measure such as repair painting may be necessary.			
Failure (IV)	0	Retrofit	Recovery	Replace	

図9 橋梁の防食リスクのマトリックス表示  
Corrosion risk matrix for steel bridges

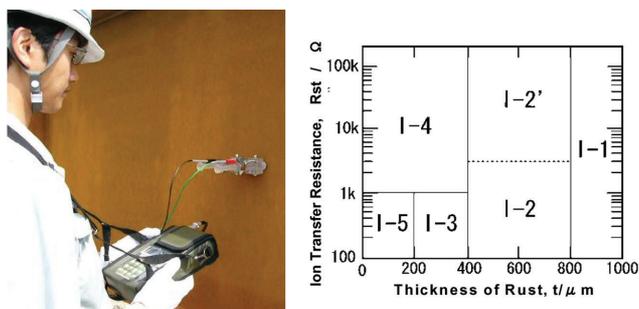


図10 イオン透過抵抗測定器によるさび状態の定量診断  
Diagnosis of rusting state of an existing weathering steel bridge obtainable by a developed instrument, R.S.T.

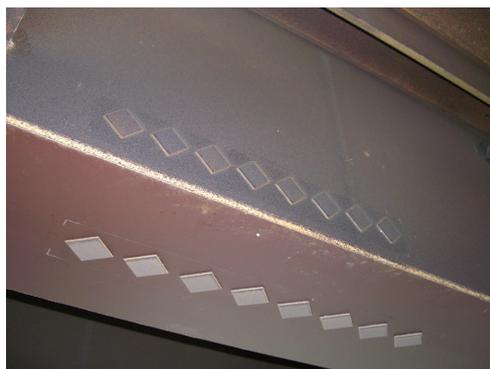


図11 実橋におけるワッペン式曝露試験の例  
Exposure test at an existing steel bridge using attachable small test pieces made of weathering steel

示すイオン透過抵抗法を用いた定量診断法を実用化している<sup>15)</sup>。

さび外観評点が2(うろこ状さび)、または外観評点1(層状剥離さび)の場合は、腐食減耗量推定のばらつきが大きい。ワッペン試験片と称する薄型の試験片を図11のように橋梁に貼り付けて曝露する方法を提案しているが、この方法により構造部位毎の腐食性を定量化でき、腐食量予測の精度を向上できる<sup>16)</sup>。

#### 5.3 補修塗装の効率的な下地処理工法

鋼橋の腐食事例の多くは、桁端部等での漏水や滞水による局部的なものである。また、プラスト処理が困難な部材に塩害により異常さびを生じた場合、従来の動力工具を用いた塗装下地処理では固着さびの除去が難しく、補修塗装の耐久性が十分とは言えなかった。

この問題を解決するために、ダイヤモンド粒付きステンレス鋼製



図12 開発工具による異常固着さび除去試験の状況  
Removing of thick adherent rust on weathering steel by a developed instrument

電動回転素地調整工具を開発した。図12は耐候性鋼材に塩水散布して1.5mmの厚さに成長させた異常さびを開発工具により除去した試験状況であるが、固着さびを難なく除去できた<sup>17)</sup>。本工具の適用によりプラスト処理に要する粉塵・騒音対策を大幅に軽減できる可能性があり、部分補修塗装の施工性と耐久性の改善が期待できる。

ダイヤモンドの特性を考慮すると作業効率と工具寿命の点から素地調整の程度は金属面が60%以上露出の水準が望ましい。この水準の素地調整で機能するさび残留面用有機ジंकリッチプライマーも併せて開発し<sup>17)</sup>、耐久性の実証に取り組んでいるところである。

## 6. 結 言

新日本製鐵は、耐候性鋼橋梁のミニマムメンテナンスによる長期耐久性の実現に向けて、新しい鋼材開発に留まらず防食リスク管理の手法を提案し、計画から維持管理までの防食設計を支援する適用評価技術、点検診断、補修技術を先行的に開発してきた。耐候性鋼材の腐食減耗予測方法とワッペン式曝露試験は、実橋の計画や維持管理の局面で利用され、公的機関の調査研究に取り上げられ適用環境評価手法高度化の中核技術として発展している。補修塗装の下地処理工法は、新日本製鐵－日鉄防蝕－大日本塗料－新日鉄マテリアルズの4社共同で開発されている。実橋適用での耐久性は検証中であるが、部分補修工法として有効性が期待できそうである。

紹介した技術が耐候性鋼材の防食法としての可能性を広げ、信頼性を高めることに貢献できるものと期待する。

### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (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書(XX). 1993-3

- 2) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, II鋼橋編. 2002-3
- 3) 三木千壽, 市川篤司:現代の橋梁工学. 数理工学社, 2004
- 4) (社)日本道路協会:鋼道路橋塗装・防食便覧. 2005-12
- 5) (社)日本鋼構造協会:耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術. JSSCテクニカルレポートNo.73, 2006-10
- 6) 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. (745), (2003-10)
- 7) Hiroshi Kihira:Corrosion Science. 49, 112-119(2007)
- 8) 宇佐見明, 紀平寛, 楠隆:耐塩害性を高めた3%Ni耐候性鋼. 新日鉄技報. (377), (2002)
- 9) 三木千壽, 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. (738/I-64), 271-281 (2003-7)
- 10) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (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書(XV). 1992-3
- 11) 保坂鐵矢, 藤井康盛, 田中睦人:3%ニッケル高耐候性鋼模擬橋梁試験体による海浜地区曝露試験(第5報). 土木学会第61回年次学術講演会
- 12) 西部和生, 田中睦人, 藤井康盛, 保坂鐵矢, 藤原良憲:さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の追跡調査について. 土木学会第61回年次学術講演会
- 13) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 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. (780), (2005-1)
- 14) 紀平寛, 潮田浩作:耐候性鋼橋梁のRisk Based Minimum Maintenance (2). 第53回材料と環境討論会講演集. C-108, 2006, p.273-276
- 15) 今井篤実, 立花仁, 松本洋明, 紀平寛:鋼構造物の腐食診断と新しい補修塗装工法の提案(1). 第29回鉄構塗装技術討論会発表予稿集. 2006-10
- 16) 佐藤光一, 池田準, 田中睦人, 山崎薫:ワッペン試験法による3%ニッケル高耐候性鋼適用性評価試験. 土木学会第61回年次学術講演会
- 17) 平松幹次郎, 三塚喜彦, 今井篤実, 相賀武英, 松本剛司, 永井昌憲, 里隆幸, 木下俊哉, 紀平寛:鋼構造物の腐食診断と新しい補修塗装工法の提案(2). 第29回鉄構塗装技術討論会発表予稿集. 2006-10