



特集記事・7

安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線

短期曝露試験による耐候性鋼材の 新しい現地適用性評価方法

New Life Evaluation Method of Weathering Steels by Using Short-term Exposure Tests

中山武典
Takenori Nakayama

(株) 神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 理事・研究首席

1 はじめに

耐候性鋼材は、普通鋼材に Cu、Cr、Ni などの元素を少量添加した低合金鋼材であり、大気環境において、緻密な保護性さび層を生成し、それが水や酸素などの腐食因子の侵入を防ぎ、以後のさびの進行を抑制する性質を持つ。それゆえ、大気環境中で裸使用がなされている¹⁻⁹⁾。近年、橋梁分野を中心に、初期建設コストの縮減や維持管理コストの軽減が従来よりも増して求められており、ライフサイクルコストの概念が浸透し、さびでさびを防ぐユニークな特性を持つ耐候性鋼材が見直されている。事実、橋梁分野での需要は年々増加の一途をたどっており、全鋼橋に対する比率は2005年には20%を超えるまでに至っている。しかしながら、耐候性鋼材は、大気環境中に塩化物イオン (Cl⁻) が存在すると、保護性さび層の形成が阻害されて腐食が進行しやすくなる。もとよりわが国は四方海に囲まれていることから、飛来塩分の影響を受けやすいことに加えて、1991年にスパイクタイヤが禁止されて以降、高速道路を中心に、凍結防止剤 (融雪塩) の散布量が増大し、山間部橋梁などでも腐食環境が厳しくなっている。このため、1990年代後半以降、JIS 耐候性鋼では使用困難な、塩化物環境下においても、無塗装の裸使用を可能とするニッケル系高耐候性鋼材が開発実用化されている^{8,9)}。

こうした耐候性鋼材の現地適用性評価方法としては、後述するように、これまで、小型試験片を用いた現地曝露試験による方法や飛来塩分量を判定指標とする方法が用いられ、模擬橋梁試験体を用いた曝露試験も一部実施されてきた。最近では、環境因子データに基づく腐食減耗量 (板厚減少量) の計算予測による方法も提案実施されている⁹⁻¹¹⁾。この中で、飛来塩分量などの間接指標によらず、建設予定地の環境条件を直接反映した腐食減耗量を評価する小型試験片を用いた現地曝露試験による評価方法が精度の面で最も適切と考えられる。しかしながら、これまでの技術では、複数年にわたる曝

露試験の継続が必要であるとともに、実橋梁の部位別腐食速度の評価 (実橋梁では、部位ごとに雨かかりや塩分の付着状況に違いがあり、腐食の進行状況が異なる) ができなかった。以上の状況より、最近、1年間程度の短期曝露試験により耐候性鋼材の長期腐食寿命を推定して、現地適用性可否を判断する新しい評価方法が提案され、適用あるいは適用に向けての検討がなされている⁹⁾。本稿では、本評価方法の概要を紹介する。本手法のベースとなる耐候性鋼材の大気腐食抵抗性について触れるとともに、従来の適用性評価方法とも比較する。

2 耐候性鋼材の大気腐食抵抗性と腐食減耗量予測技術

JIS 耐候性鋼材の橋梁への適用性を調査する目的で、1980年から、当時の建設省土木研究所、(社) 鋼材倶楽部 (現、日本鉄鋼連盟)、(社) 日本橋梁建設協会の三者が共同で全国41橋の桁下に耐候性鋼小型試験片を曝露するとともに環境調査を実施した¹⁻³⁾。9年間の曝露試験結果から算出した100年後の腐食減耗量の予測結果と試験片の生成さびの外観評価から、飛来塩分は耐候性鋼にとって悪影響があることが明らかとなった。これより、耐候性鋼を橋梁に適用できる環境は、飛来塩分量が NaCl に換算した Cl 量として 0.05mdd (mg/dm²/day) 以下でなければならないとの制限が定められるとともに、耐候性鋼材の腐食減耗量の経年変化の解析から、その推定式として、以下の (1) 式が提案された (Y: 腐食減耗量 (mm)、X: 曝露期間 (年)、A 及び B: 環境条件や合金成分から決まる係数)。

$$Y = A \cdot X^B \dots\dots\dots (1)$$

三者共研の曝露試験結果から、飛来塩分量が0.05mdd以下の条件でのJIS耐候性鋼の腐食減耗量を予測した曲線を図1に示す³⁾。この予測曲線は(1)式に従っており、JIS耐候性鋼が適用可能な飛来塩分量が0.05mdd以下の条件では、JIS耐候性鋼の大気腐食抵抗性として、50年度の片面腐食減耗量が0.3mm以下、100年後のそれが0.5mm以下を満たすことがわかる。

ここで、(1)式の A 値は、 $X=1$ (年)とおいたときの腐食減耗量 Y 値に等しく、その曝露サイトの大気腐食環境の腐食性を定量的に示す指標を意味する。特に、橋梁の代表部位(内桁の下部)を対象として評価されたJIS耐候性鋼材(SMA)の指標を A_{SMA} と記す。 B 値について同様に評価された指標を B_{SMA} と記す。ここで、初年腐食量である A_{SMA} 値を求める方法としては、腐食因子や気象因子から計算で求める方法と実際の曝露試験から求める方法がある。さらに、 A_{SMA} と B_{SMA} との相関が検討され(図2)、耐候性鋼材の無塗装橋梁への適用判断に資する腐食減耗予測モデルが提案されている^{10,11)}。すなわち、前述の方法により、 A_{SMA} 値を求め、次

に、 A_{SMA} および B_{SMA} の関係から B_{SMA} 値を求めることができる。その結果、式(1)より X 年後の累積腐食減耗量 Y を予測することができる。また、ニッケル系高耐候性鋼材については、耐候性合金指標 V 値を用いて、 A 値、 B 値の換算を行うことで、JIS耐候性鋼材と同様に X 年後の累積腐食減耗量 Y を計算予測することがなされている。以上の耐候性鋼材の腐食減耗量予測のフロー図を図3にまとめる^{9,10)}。この中で、今回紹介する短期曝露試験による耐候性鋼材の適用性評価方法は、建設予定地において1年間の実曝露試験を行って、初年腐食量パラメータの A_{SMA} 値を求める方法であると位置付けられる。

3 新しい現地適用評価方法の概要

本手法では、図4に示すワッペン試験片と称する薄く軽量の板状試験片(2^t×40～70^w×40～70mm程度)を用いて、

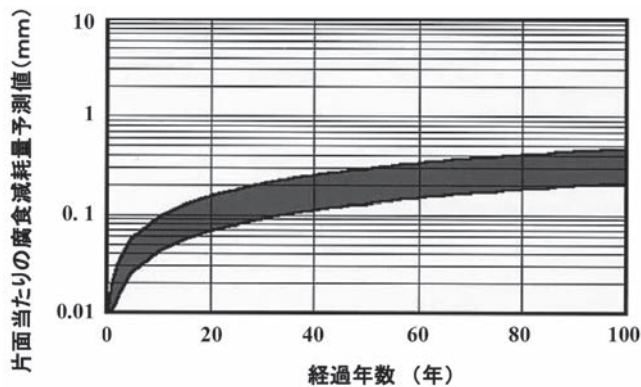


図1 飛来塩分量0.05mdd以下の条件でのJIS耐候性鋼の腐食予測曲線³⁾

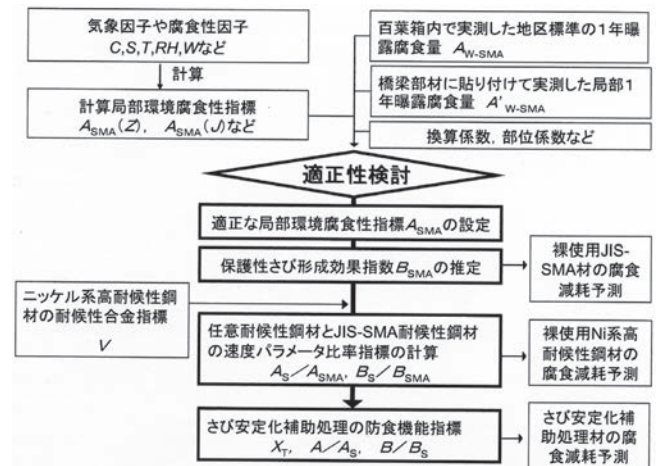


図3 耐候性鋼材の腐食減耗予測計算のフロー図¹⁰⁾

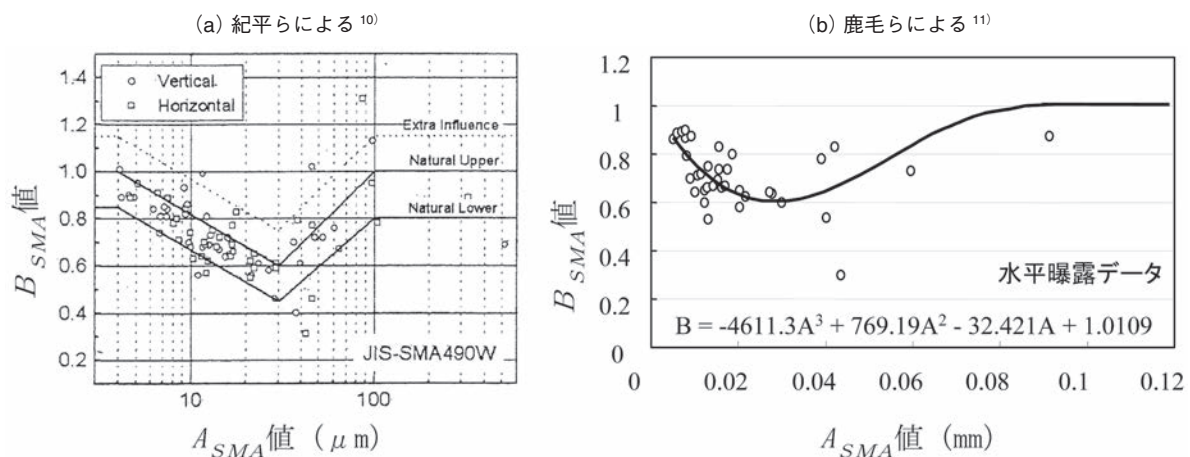


図2 JIS耐候性鋼の全国41橋9年曝露試験結果における A_{SMA} と B_{SMA} の関係

それを既設の実橋や仮設の簡易曝露架台中の専用装着板に接着する。その利点は、前述したように、第一に、*A* 値と *B* 値の間に認められる相関関係⁹⁻¹¹⁾を利用することにより、1年間の曝露試験データ (*A*) から、耐候性鋼材の適用可否判定が可能なことである。第二に、従来の飛来塩分量測定では、月毎の飛来塩分量を1年間収集する必要があり、そのための労力・現地往復費用 (12回) を要するが、本手法の腐食減耗量測定では、試験開始と終了時の現地往復2回でよく、労力・費用の軽減が期待される。第三に、腐食減耗量測定では、飛来塩分だけでなく、温度や濡れなどの全ての腐食因子を含んだデータが得られるため、原理的に、飛来塩分量測定よりもより高精度の適用性可否判断が可能である。第四に、橋梁の様々な部位に直接試験片を貼り付けることが可能であり、部位ごとの腐食減耗量の相違を明確に評価することが可能であり、既設橋梁のモニタリングや部位別腐食環境評価に使用することもできる。本手法では、図5に示すように、ワッペン式試験片によって得られる1年間の腐食減耗量を橋梁の代表部位 (雨かかりがなく腐食環境として厳しい内桁下部) における腐食減耗量に適性補正し、防食の要求レベルに応じた

しきい値と比較することにより、適用可否の判定を行う。

本手法には、簡易架台型と既設橋梁型の2種類がある。前者では、現状、橋梁の内桁環境条件をよく再現する簡易架台として、百葉箱が推奨されており、箱内部に設置した専用装着板にワッペン試験片を取り付ける。一方、後者では、建設予定地近隣にある既設橋梁にワッペン試験片を取り付ける。本手法の特徴を従来の方法と比較して表1に示す。

4 新しい現地適用性評価方法の実際

4.1 簡易架台型曝露試験

簡易架台型は、建設予定地もしくはその近郊に既設橋梁がない場合に実施する現地曝露試験で、当地に所定の簡易曝露試験架台 (百葉箱) を設置し、その架台内にワッペン試験片を曝露して1年間の腐食減耗量を求める。現在、百葉箱による試験結果は、I桁の代表部位 (雨かかりがなく腐食環境として厳しい桁下部) との環境の再現性が良好であることが確認されている。しかし、箱桁やその他の形式の橋梁についてのデータはなく、それらを考慮することは今後の課題である。本曝露試験の実施状況を図6に示す。

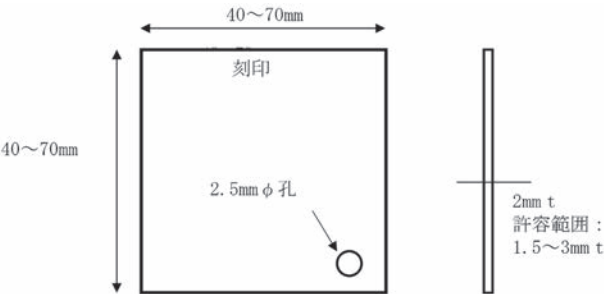


図4 ワッペン試験片の形状

表1 耐候性鋼材の現地適用性評価方法の比較

評価方法の分類		評価指標	所要期間	期待精度と留意点
飛来塩分量測定		飛来塩分量	≧1年 (1ヶ月毎)	△ 測定方法による差異、年・季節変動が大きい
従来の曝露試験	橋梁模型	曝露期間の腐食減耗量	≧3年	△ 腐食面凹凸影響より精度良い測定は困難
	架台 (小型試験片)	設計供用期間の腐食減耗量	≧3年	○ 実橋との差異を考慮し補正が必要
腐食環境因子 (飛来塩分量、気温、湿度等) に基づく腐食減耗量計算		設計供用期間の腐食減耗量	0年 (環境測定する場合: ≧1年)	△ ~ ○ 内桁下部の平均腐食量を確率統計的に算定
新しい曝露試験	簡易架台型 (ワッペン式)	局部環境腐食性指標 A_{SMA}	≧1年	○ 実橋との差異を考慮し補正が必要
	既設橋梁型 (ワッペン式)			

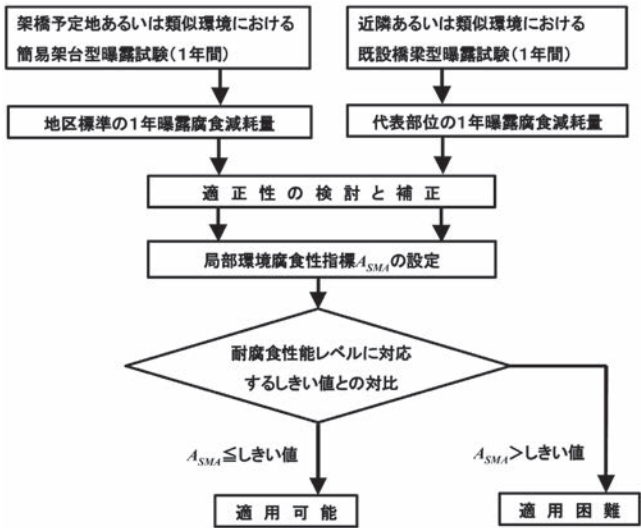


図5 短期曝露試験による現地適用性評価方法のフロー図

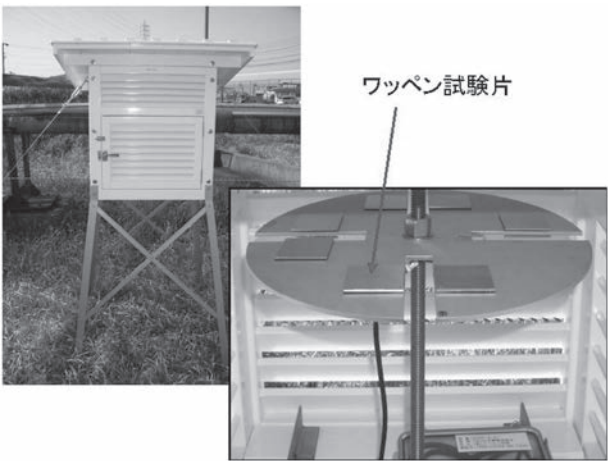


図6 百葉箱を用いた簡易架台型ワッペン式曝露試験の実施例

4.2 既設橋梁型曝露試験

既設橋梁型は、建設予定地もしくはその近郊に既設橋梁がある場合に実施する現地曝露試験であり、当地の既設橋梁内の腐食条件を代表する内桁にワッペン試験片を曝露して、1年間の腐食減耗量を求めることを原則とする。また、部位ごとの腐食環境の違いを明確化する目的で様々な部位へ添付する試験も可能である。現状では、I桁の場合には部位ごとの厳しさに関するデータ（外桁、内桁の内外、腹板フランジ上下など）が得られており、その影響を考慮することが可能である。架橋環境の代表部位としては、全国41橋曝露試験時に小型試験片が取り付けられた内桁下部が一般的であるので、I桁の場合は下フランジの上下面に試験片を取り付けて試験を行うことが望ましい。本曝露試験の実施状況を図7に示す。

4.3 短期曝露試験データに基づく適用性評価方法

耐候性鋼橋梁の防食に対する要求性能については、設計供用期間中、想定される作用（環境）のもとで、鋼材の腐食減耗量が予め想定した範囲内にあるものとし、その腐食減耗量の範囲については、耐腐食性能レベルを設定することにより定めることにしている。一般に、耐候性鋼橋梁では、腐食減耗量が、片面当り、平均0.5mm/100年以下を目標とする。これに対応する局部環境腐食性指標 A_{SMA} のしきい値は0.030mmとされている⁹⁾。このことから、建設予定地における適用性は、初年腐食量の実測値から、その試験の実施された橋梁部位の環境面の厳しさを反映した補正を行うことによって求めた局部環境腐食性指標(A_{SMA})が上記のしきい値0.030mmを超えるか否かで判断する。

ここで、補正を行う理由は、実橋梁においては、部位によって付着塩分や濡れ時間など、腐食条件が異なり、試験片形状の違いや、曝露位置や部位の違いによって様々な1年曝

露腐食減耗量が得られ、橋梁によっては代表環境である三者共研の橋梁内曝露位置よりも腐食環境がより厳しい部位が存在することがありえるからである。また、橋梁によっては試験片の貼り付け部位に制約があり、橋梁の代表部位における初年腐食量が直接に求められないケースもあるからである。ここで、補正係数の一覧と提示可能な値の例を表2に示す⁹⁾。

一方、曝露試験を行ってワッペン式試験片の腐食減耗量を求める際には、精密な質量測定が不可欠であり、さび除去工程で問題となるブランク減量誤差を、腐食減耗量として0.3 μm 以下にまでミニマイズする方法も提案されている¹²⁾。また一度それを測定するとその後の経年評価には使えなくなるという問題点がある。これに対して、腐食減耗量とその時点でのさび厚には、相関関係が確認されているため、このさび厚を適用性評価の基準に用いることができる。判断指標としての「片面平均腐食減耗量が100年で0.5mm」に相当する A_{SMA} 値(0.03mm)に対応するJIS耐候性鋼材のさび厚平均値は概ね100 μm である。さび厚の場合も前述のように試験状況に応じて、補正係数を用いて補正することができる。

5 おわりに

以上は、日本鋼構造協会・鋼橋性能向上研究委員会・耐候性鋼橋梁部会⁹⁾で提案されている新手法である。本手法では、短期(1年間)に、低コストで精度よく耐候性鋼材の適用可否が判断可能である、但し、適用が始まったばかりの新しい技術であり、判定しきい値や補正の信頼性向上、試験方法の簡易化・低廉化、適用環境判定方法の妥当性検証などの課題が残されている。このほかにも、耐候性鋼材においては、ニッケル系高耐候性鋼の性能規定の策定、凍結防止剤の影響評価と対策規定の整備、経過観察を要する異常さび(外観評点1、2)の判定診断技術と経年腐食量の予測技術などの課題が残されている。これら課題が一つ一つ解決されて、ラ

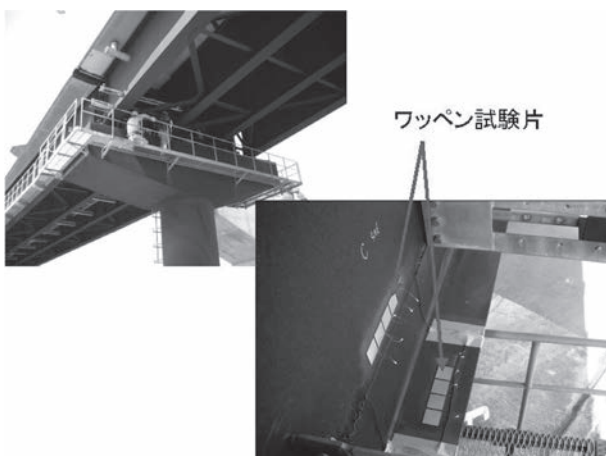


図7 既設橋梁型ワッペン式曝露試験の実施例

表2 ワッペン式試験片を用いた現地適用性試験における補正係数の例⁹⁾

(三者共研41橋の小型試験片JIS-SMA水平曝露材を1とする)						
ワッペン試験の種類	橋梁形式	ワッペン試験片の添付位置			補正係数の例	
		区分	位置	部位	有田大橋	衣通高架橋
簡易架台型	I桁	百葉箱内部		上下面 (平均)	—	1.0
	その他	現状、評価対象データなし				
既設橋梁型	I桁	外桁	外面 (雨がかりあり)	ウエブ	(0.7)	(0.9)
				下フランジ上下面 (平均)	(0.8)	—
		内桁	内面 (雨がかりなし)	ウエブ	(0.7~0.8)	(0.7~1.0)
				下フランジ上下面 (平均)	0.8~1.1	0.9~1.1
	その他	現状、評価対象データなし				

注) 括弧内の値は、現状の本指針では扱わないため、参考値である

ライフサイクルコストを低減する構造用材料として、今後ますます発展寄与していくことを期待したい。

参考文献

- 1) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XV), 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会, (1992)
- 2) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XVIII), 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会, (1993)
- 3) 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) 一無塗装耐候性鋼の設計・施工要領 (改訂案) -, 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会, (1993)
- 4) 三木千壽, 市川篤司, 鵜飼真, 竹村誠洋, 中山武典, 紀平寛: 土木学会論文集, (2003.7) 738I-64.
- 5) 三木千壽, 市川篤司: 現代の橋梁工学 塗装しない鋼と橋の技術最前線, 数理工学社, (2004)
- 6) 松島巖: 鉄鋼技術の流れ7 低合金耐食鋼 一開発, 発展, そして研究一, 他人書館, 東京都新宿区中町 15 番地, (1995), 15.
- 7) 中山武典: 材料, 50 (2001), 452.
- 8) 中山武典, 藤井康盛, 福本博光: ふえらむ, 10 (2005), 932.
- 9) 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, (社) 日本鋼構造協会・鋼橋性能向上研究委員会・耐候性部会編, (2006)
- 10) 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: 土木学会論文集 (2005.1) 780I-70, 71.
- 11) 鹿毛勇, 塩谷和彦, 竹村誠洋, 小森務, 古田彰彦, 京野一章: 材料と環境, 55 (2006), 152.
- 12) 中山武典, 紀平寛, 幸英昭, 鹿毛勇: (社) 腐食防食協会・第 145 回腐食防食シンポジウム資料, (2004), 59.

(2008 年 9 月 22 日受付)