

特集 鉄鋼材料への機能性付与
鋼橋の防錆・防食機能

耐候性鋼による 無塗装橋梁

鉄は強く丈夫なため、これまで多くの公共施設や土木施設に使われてきた。しかし鉄を使用する時には、「さび」をどのように防ぐか、という問題が常に立ちはだかっている。鉄鋼材料の研究者、技術者は昔も今も、さまざまなアプローチで、「さび」を防ぐ方法を模索してきている。さびによる劣化を防ぐための一つの回答が、耐候性鋼である。無塗装でも、橋の長寿命化が図れる耐候性鋼に、社会的な期待も高まっている。

耐候性鋼が形作るアーチが美しい
奥阿蘇大橋（熊本県、1989年竣工）

橋梁用材料として定着した耐候性鋼

耐候性鋼は、大気耐食性(耐候性)を高めた鋼種で、普通鋼にCu、Cr、Niなどの元素を少量添加した低合金鋼である。大気中では、緻密な保護性さび層を生成し、それが水や酸素などの侵入を防ぎ、それ以後のさびの進行を抑制することができ、そのため無塗装で使用することができる。

世界で初めての耐候性鋼は、1933年にUSスチール社が開発したCOR-TEN鋼®である。当時の構造用炭素鋼に比べ耐候性に優れ、高強度であるという特徴を持ち、当初は鉄道貨物用車両などで塗装して使用された。

第二次大戦後、日本でもCOR-TEN鋼®が徐々に知られるようになり、耐候性鋼の研究が開始され、改良されていった。米国では初めての無塗装の耐候性鋼橋であるエイトマイルロードハイウェイブリッジが1964年に建設され、続けて、国内でも1967年には耐候性鋼を使用した知多2号橋や村中小橋が建設された。その後、1969年建設の第一両国橋（長さ472m、鋼材重量860t）、1973～1978年建設の室蘭新道（橋梁総延長2,707m、鋼材重量約7,800t）など、無塗装の耐候性鋼橋は徐々に増加していった。また鉄道

でも1980年会津線第三大川橋梁に初めて採用され、以後も多く使用されている。橋梁への耐候性鋼材の使用量は年々増加し、全鋼橋の中で耐候性鋼材が占める割合は15%程度となっている。

耐候性鋼のJIS規格化は、1968年のJIS G3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」が最初である。化学成分に関する改訂（1983年）では、塗装仕様（記号の最後にP）と無塗装仕様（記

■橋梁への耐候性鋼適用量



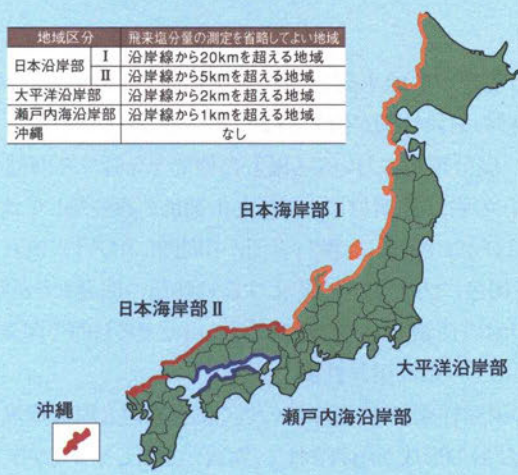
(社)日本橋梁建設協会調べ

■三宝入路橋（大阪府、1981年竣工）のさびの経年変化



■耐候性鋼の離岸距離における適用可能範囲

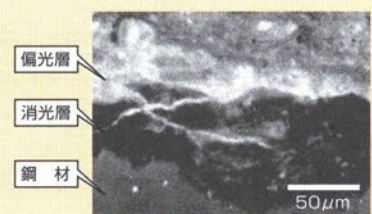
- 飛来塩分量が0.05mdd (mdd:mgNaCl/100cm²/day) 以下の地点では無塗装使用できる。
- 飛来塩分量測定を省略して無塗装使用できる地域は下記のとおり。



「耐候性鋼の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)」を元に作成

■安定化した耐候性鋼材さび層の断面

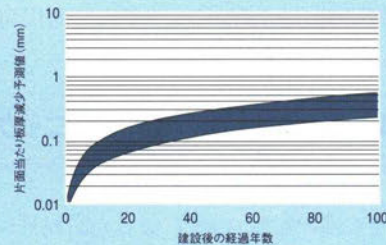
さび層の断面を偏光顕微鏡で見ると、外側から偏光層、消光層の2層で構成されていることがわかる。このうち消光層が腐食因子を遮断して防食性を発揮する。



「現代の橋梁工学」三木・市川編著(数理工学社)より

■板厚減少予測線図

飛来塩分量0.05mdd以下における100年後の板厚現象予測。全国22箇所の橋桁の間に試験片を9年間水平暴露した結果に基づいている(17年間暴露結果からも検証済み)。



建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会共同研究試験データより算出

号の最後にW)の2種類の耐候性鋼材(SMA材)が規定された。このうち、橋梁用途ではWが用いられている。JIS規格化を契機に、耐候性鋼は本格的に鋼道路橋示方書や鋼鉄道構造物等設計標準に取り入れられるようになり、ユーザーにも徐々に認知されるようになった。

緻密な保護性さびの生成で耐候性を向上

耐候性鋼は、使用当初より普通鋼と同様にさびが発生するものの、時間経過とともにさびの進行が次第に抑制されていくという特性を持っている。

長期間暴露して安定した、耐候性鋼材表面のさび層は2層構造になっている。偏光顕微鏡で見ると、表面側にあり明るく見える部分(偏光層)と、鋼材面に接していて暗く見える部分(消光層)があるのがわかる。このうち内層の消光層は、緻密な保護性さびとなり、この層は腐食促進物質の透過抑制作用があり、密着性が高いため、防食性を発揮する。

普通鋼材に発生するさびにも偏光層と消光層があるが、さび層は耐候性鋼のように2つの層に分かれず混じり合っており、イオンが透過しやすく、壊れやすい性質を持つ。そこで、さび層の一部分から腐食反応が継続し、さびが進行しやすくなる。

耐候性鋼橋では、さびの特徴を把握した上で設計を行い、力学的に問題がない範囲で腐食させることによって、さびによる劣化を制御している。

日本で、耐候性鋼の普及が始まった1970年代には、耐候性鋼の適用地域を含めた設計・施工要領について、明確な規定がなかった。1981年に当時の建設省土木研究所、当時の(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会の三者により「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究」(三者共研)が発足した。この共同研究では、環境調査及び長期暴露試験片による腐食状態の把握について、9年間にわたり調査、観察が実施された。

この共同研究に基づき、1993年「無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改訂版)」が発行され、耐候性鋼の適用環境や腐食因子を明確にした上で、設計方法の整理と統一化が図られた。この中で、無塗装耐候性鋼の最も大きい腐食因子は塩分である

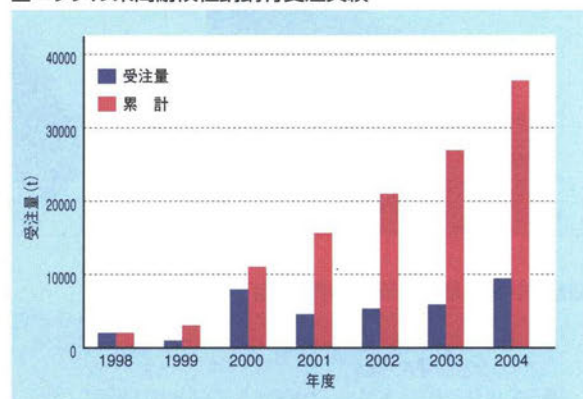
特集 鉄鋼材料への機能性付与 鋼橋の防錆・防食機能

■各種高性能鋼の特色と適用の効果

各種耐候性鋼	鋼材の特色	適用による効果
降伏点一定鋼	板厚が40mmを越えても、40mm以下と同じ降伏点を保証	・板厚が40mm越えでの重量軽減設計簡素化
高じん性鋼	高いシャルピー吸収エネルギーを保証	・厳しい曲げ加工が可能
予熱低減鋼	合金元素量を低減し溶接時の必要予熱温度低減が可能	・施工能率向上 ・溶接継手部の信頼性向上
大入熱溶接対策鋼	大入熱溶接をしても、溶接熱影響部のじん性低下が少ない鋼材	・溶接施工の効率化図れる ・溶接継手部のじん性向上
耐ラメラテア鋼	板厚方向の絞り性能を保証	・溶接後のラメラテア発生防止
LP鋼板	板長さ方向に板厚が連続的に変化する鋼板	・重量軽減、フィラープレート省略
ニッケル系高耐候性鋼	Ni、Cu、Mo、Ti等の合金元素量を増し、耐塩分性向上を提案中の鋼材	・従来耐候性鋼より優れた耐塩分性を有する

(社)日本鉄鋼連盟資料より

■ニッケル系高耐候性鋼鋼材受注実績



とされ、橋梁に適用できる環境は飛来塩分量が0.05mdd (mgNaCl/dm²/day) 以下でなければならないとしている。そして暴露試験結果に基づいて、50年後の腐食量が0.3mm(100年後では0.5mm)を超えないことを前提に、海岸からの離岸距離を指標に全国を5ブロックに分類して適用可能範囲を規定している。

より厳しい環境に適応するニッケル系高耐候性鋼

橋梁用の耐候性鋼は、優れた耐候性に加え、溶接構造用鋼材としても優れた特性(機械的特性及び溶接性)を発揮する。また耐

候性鋼の需要が増加するにつれて、市場の要求に適応し、特徴のある各種の耐候性鋼が開発されている。開発の方向性としては、より厳しい塩分環境においても優れた機能を発揮する鋼種の開発や、現在の耐候性鋼材にさび安定化補助処理を施して流れさび(安定さびができる前に、鋼材表面から周囲にさび汁が流れ落ち、表面を茶褐色に汚すさび)を防止する処理剤の開発などがある。

従来の耐候性鋼よりさらに耐候性を向上させる目的で開発されたのが、ニッケル系高耐候性鋼である。

従来の耐候性鋼では、海岸線の近くなど、過酷な塩分環境では、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。また、1991年にスパイクタイヤの使用が禁止されて以降、凍結防止剤散布量増加により、腐食環境がいつそう厳しくなってきた。

ニッケル系高耐候性鋼は、従来の耐候性鋼材と同様に2層のさび層を持つが、より緻密で保護性に優れた保護性さびを持たせるように設計されている。ただし耐候性に優れているとはいっても、海水の飛沫が直接影響するような環境条件下の使用は想定されていない。1998年の発売当時は海岸海浜耐候性鋼と呼ばれ、海岸部でも問題なく使用できるような印象を持たれたことがあったが、設計、施工にあたっては従来の耐候性鋼と同様に、鋼材の特性に合ったものとする必要があることは言うまでもない。

ニッケル系耐候性鋼材の受注量は、販売開始の1998年から2004年までの間に3万tを超える((社)日本鉄鋼連盟調査による)。ニッケル系高耐候性鋼が採用された橋梁の架設場所としては、飛来塩分量の多い沿岸地域(日本海側など)を中心に利用されている。

耐候性鋼のさびを生かす「さび安定化補助処理」

耐候性鋼材の使用初期には、さび層がまだ十分な保護性を有しない短期間のうちに流れさびが発生し、周囲の構造部位を汚して美観を損なうことがあった。さび安定化補助処理は、耐候性鋼材の腐食速度を制御し、初期流れさびの発生を抑制し、周囲の汚損を防いで景観性を調整する表面処理技術である。使用環境が適切であれば、さび安定化補助処理剤の消失後には、無塗装仕様の場合と同様に、安定した保護性さびが形成されている。最近では、景観に調和する着色がなされた景観仕様のさび安定化補助処理剤の開発も行われており、デザイン的な配慮が求められる橋梁への採用が期待される。



景観仕様のさび安定化補助処理剤を適用した効安質高架橋(写真提供:川田工業(株))

長期間使用で、優れたLCC効果を発揮

耐候性鋼は最近では、橋梁のライフサイクルコスト(LCC)の低減に効果があることから期待を集めている。橋梁の維持管理コスト



北陸新幹線北陸道架道橋（新潟県、1999年竣工）は、ニッケル系高耐候性鋼の初めての適用例である。



山梨リニア実験線に建設された小形山架道橋（山梨県、1996年竣工）

を低く抑え、LCCを低減することは重要な課題となっており、100年間のLCCを考慮する設計が義務付けられようとしている。国土交通省は、最小限の維持管理で最大限の長寿命化を目指す「ミニマムメンテナンス橋」の構想を示している。

たとえば同じ規模の橋梁で、無塗装耐候性鋼使用の場合と、C系塗装（重防食塗装の一種）を用いた場合、従来塗装系の場合のLCC試算を比較した例（5ページ右図参照）を見ると、無塗装耐候性鋼使用の場合は他に比べて経費が少なくてすみ、100年ないし200年経過するとそのメリットがいっそう拡大することがわかる。

耐候性鋼材は、適切な計画、設計、施工、維持管理を実施することにより、無塗装で優れた防食性能を発揮するため、LCCの観点からも優れた橋梁用材料と言える。

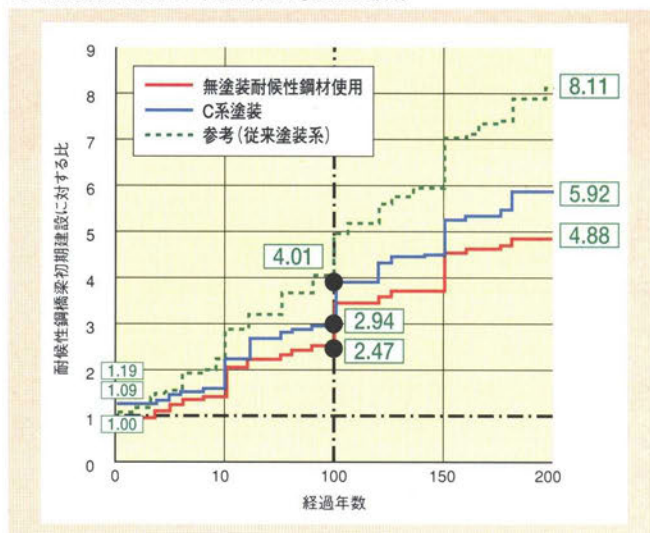
このように優れた特性を持つ耐候性鋼橋の、今後の可能性はどのようなものだろうか。耐候性鋼橋に詳しい東京工業大学土木工学科の三木千壽教授によれば、「耐候性鋼橋の社会的な意義は大きいが、そのためには耐候性鋼の性質への理解をいっそう深めることが必要である。今後は耐候性鋼を使用する側も、提供する側も、耐候性鋼の特徴をよく理解した上で橋梁を建設すること



ふれあい橋（千葉県、1987年竣工）は都市景観と調和するデザインの斜張橋

■耐候性鋼橋梁と防食仕様鋼橋のLCC試算例

橋長120m、幅員11.5mの3径間連続鋼桁橋で、耐候性鋼、C系塗装、従来塗装系のLCC試算結果を比較した。（構造要素仕様、耐久時期、取り替え費用は同一、10年ごとに定期点検実施、200年架け替え不要とした場合）



が大切である」と言う。そもそも耐候性鋼は、長期間にわたって使用することを前提として開発されており、優れた特徴を長期間発揮するためには、適切な計画、設計、施工、維持管理を行うことが重要なのである。

インフラストラクチャーである橋梁にとって、耐候性鋼の採用による長寿命化は、社会的にも大きな意義を持つ。鉄鋼業界でも、耐候性鋼橋を計画、維持管理するユーザーに、十分な情報の提供を継続的に行うことが重要だといえるだろう。また、社会資本の充実が進められているアジア各国でも、今後長寿命な橋梁へのニーズが高まることだろう。日本の優れた耐候性鋼の技術が、より広く活用されていくことを期待したい。

- 取材協力 東京工業大学土木工学科・三木千壽教授、(社)日本鉄鋼連盟
- 取材・文 杉山香里