

耐久性に関する早期のデータ拡充が期待される。

6.4.3 鋼構造物の重防食

社会資本の整備が進むなかで橋梁、海洋・港湾施設などにおける鋼構造物は大型化し、海岸・海上などの過酷な腐食環境で設置される一方、塗装熟練工の不足や補修費の高騰により、メンテナンスフリーの長期耐久防食技術や維持管理技術が重要視されてきた。重防食技術は鋼構造物の寿命延長をはかるコストパフォーマンスの優れた塗覆防食全般を指し、塗装、有機および無機ライニング、有機・無機複合防食工法などを含み、時代の要請に応じて近年著しく発展した。ここでは鋼橋と海洋・港湾鋼構造物を中心に重防食の発展と課題について概説する。

(1) 鋼橋

鋼橋塗装の歴史は、1960年以前は諸外国、日本とも下塗り油性系鉛丹塗料+上塗りフタル酸樹脂塗料系が圧倒的に多く、今日の温和な腐食環境用塗装仕様に相当する比較的薄膜(130~180 μ m)の一般塗装系であった。

1960年若戸大橋や東海道新幹線橋梁以降鋼橋塗装技術は著しく進歩した。ショットブラスト、ショッププライマー、タールエポキシ塗料、ジンクリッチプライマーが使用され、さらに耐水・防食性の優れた合成樹脂塗料の開発と相まって厚膜の重防食塗装の基礎ができた。

大型鋼橋に重防食塗装が使用され始めたのは境水道大橋(1970年):無機ジンクリッチプライマー+塩化ゴム系塗料、関門大橋(1971年):亜鉛溶射+フェノールMIO+塩化ゴム系塗料からであり、前者は米国、後者は英国の重防食塗装の流れをくむものであった。本邦の重防食塗装の本格的な使用は本州四国連絡橋からであり、海峡部橋梁の上部工の塗装仕様が日本土木学会など衆知を集めて検討・決定された(1976年)。大三島橋(1978年)、因島大橋(1982年)、大鳴門橋(1985年)、瀬戸大橋(1988年)で、下塗りに厚膜型無機ジンクリッチペイントにフェノールまたはエポキシMIOや厚膜型エポキシ樹脂塗料を組合せ、中、上塗りに塩化ゴム塗料かポリウレタン樹脂塗料系の厚膜(225~258 μ m)の重防食塗装が適用された。10~15年後の今日、塗膜はほぼ健全で、軽いメンテナンスのみで経過している。

この実績を踏まえて現在建設中の明石海峡大橋、関西新空港連絡橋、東京湾横断道路橋では、中塗りにウレタン樹脂塗料またはエポキシ樹脂塗料、上塗りに景観を重視した高耐候性のふっ素樹脂塗料が適用され、塗替周期は15~20年と期待されている。

1970年代後半日本道路公団、首都高速道路公団など各公団、公社、官公庁等の諸機関は、鋼橋塗装に重防食塗装を採用、規格・仕様、積算価格を設定した。最近では1990年に「鋼道路橋塗装便覧」(日本道路公団)や「鋼橋塗装基準・同解説」(本州四国連絡橋公団)が大幅に改訂された。重防食塗装はここ10年間本州四国連絡橋などの施工実績が増加する

なかで、その仕様、施工、品質、耐久性などに関する評価がほぼ定着した感がある。特に重防食塗装は工場塗装管理が基本であり、素地調整のグレードの確保、高粘度、高速硬化塗料の塗装・膜厚管理、鋼橋の構造・部位ごとの塗工配慮が重要である。

鋼橋における重防食塗装は上部工の外表面ばかりでなく、箱桁、橋脚、塔などの内面塗装に使われる。従来のタールエポキシ樹脂塗料に替わり、最近では照明効果の大きい変性エポキシ樹脂塗料(270 μ m)が使われる。継手部外面にも超厚膜エポキシ樹脂塗料とフッ素樹脂塗料系(430 μ m)が使われ、添接部では従来の未塗装から摩擦すべり係数を確保した厚膜型無機ジンクリッチペイントや防錆ボルトなどが使われ、継手防食性能を一段と向上させた。ケーブル類においては主ケーブルに重防食塗料のはけ塗り、ハンガーロープにディッピング塗装が適用された。斜張橋ケーブルには亜鉛めっきケーブル素線を黒色のポリエチレン管で覆い、ポリウレタン樹脂を圧入した複合重防食が櫃石島橋、岩黒島橋で使用された。海峡橋梁の鋼製橋脚で海洋環境のなかで最も腐食環境の厳しい飛沫・干満帯部位の防食技術としてモルタル(100mm)+鋼管(12mm)+超厚膜エポキシ樹脂塗料(2.5mm)系(関西新空港連絡橋)やチタンクラッド(チタン1mm+鉄4mm)(東京湾横断道路)などの新メンテナンスフリー複合重防食系が供用され、現在長期耐久性を確認段階である。

我が国の鋼道路橋のストックは約6万橋(橋長15m以上)、また鋼鉄道橋は5万連を越え、これらの維持管理のうち塗替え費の占める割合は大きく、合理的・経済的な塗替え周期、補修法を決定することは重要な課題である。日本鋼構造協会、JRなどの諸機関は鋼橋塗装の実態調査によって、塗膜劣化評価法(塗膜劣化度、発錆率、ケレン度など)、塗膜劣化因子(環境、構造部位、塗装系)を検討し、塗替周期を決定した。その後これに基づいて「ライフサイクル」概念を導入した合理的な塗膜設計手法および塗替・補修法が提案(1984~1989年)された。調査塗装系は油性鉛丹塗料+フタル酸樹脂塗料系が大部分であったが、重防食塗装の塗替基準・方法においても各機関などで設定(1985~1990年)され、実務的な手引書(1988~1992年)が作成されたが、データベースに基づいた検討は今後の実績を待たねばならない。

(2) 海洋・港湾鋼構造物

石油掘削リグ、プラットフォーム、シーバース、海中展望塔、ブイなどの海洋構造物の重防食技術には、船舶に適用された重防食:ショットブラストとジンクリッチプライマー+タールエポキシ塗料系が多く適用された。過酷な腐食環境の飛沫、干満帯の防食技術はエポキシ樹脂塗料、フレック入り樹脂塗料、ゴム、セメント、レジンモルタル、FRP、モネル、キューロニッケルなどのライニング、防食テープの使用実績があり、1970~1980年代にNACE、造船工業会などで規格化され、現在はほぼこの規格に添って適用されている。

港湾鋼構造物は1950年代後半から栈橋、保船岸壁や護岸

用に大量に建設され、ストックが増大した。約20年経過した1970年後半腐食問題が顕在化し、詳細な港湾施設の腐食調査をもとに「港湾鋼構造物防食マニュアル」, 「同補修マニュアル」(沿岸開発技術センター, 1986年)が発行され、最近では「海洋鋼造物の防食指針・同解説(案)(飛沫帯・干満帯編)」(建設省土木研究所), 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(日本港湾協会), 「港湾鋼構造物調査診断・防食補修法」(防食補修工法研究会)などが改訂・標準化された。従来の港湾鋼構造物の腐食対策は、腐食代と電気防食が中心であったが、最近重防食塗覆装が推奨され、海洋大気部は重防食塗装、飛沫・干満帯・海中部用塗覆装は、ポリエチレン、ポリウレタン、水中硬化型エポキシ樹脂などの有機ライニング、モルタルライニング、FRP型枠+ペトロラタムなど複合防食工法の実績が多く、後者の3防食法は補修用にも適用される。膜厚2.0~2.5mmのポリエチレン、ポリウレタン樹脂を工場ライニングした重防食鋼管杭・鋼矢板・鋼管矢板が、1980年代前半鉄鋼会社から上市、港湾施設を中心に需要が伸び、現在重防食化率は鋼杭150万t中3~4%を占める。今後は河川施設へ適用され、増加傾向にある。また景観機能を付与した「カラー重防食鋼杭」が開発(1988年)され、グレイ、ブルーなどの単一色が使われ始めた。さらに装飾・デザイン性のある「模様調重防食鋼矢板」が製品化

(1990年)され、現在建設省土木研究所を中心に耐候・耐久評価法、カラー色の標準化、景観設計への利用が検討されている。

海洋環境の鋼構造物の防食技術においては、今後橋梁、人工島、空港などの社会資本関連のトータルライフコストミニマムの長期耐久防食技術と維持管理技術の開発が重要課題となる。

建設省土木研究所、運輸省港湾技術研究所、鋼材倶楽部、鋼管杭協会などの諸機関は、長期耐久性と低コスト防食技術の確立を目的に、駿河湾、沖の鳥島、波崎沖、フィリピン・インドネシア海域で約15~20年間の長期暴露試験を実施中である。現在のところ重防食塗装(15~20年)、有機ライニング、無機ライニング(40~50年)、複合防食工法、チタンライニング、ステンレスライニング+電気防食(100年)、および各種防食補修工法が提案されている。今後これらの実構造物の耐久性の確認と新規メンテナンスフリー防食技術の開発、鋼構造物の維持管理のための検査・診断、モニタリング、補修・施工などの防食技術の確立が急務となる。

その他砂防、ダム、河川、海岸、トンネル、下水道などの土木鋼構造物あるいは鋼コンクリート構造物の防食技術は未完成であり、重防食技術は今後の問題解決の重要な手段を与えると考えられる。

6.5 基盤研究

6.5.1 Zn合金めっきの電析機構

電気めっきで得られるZn合金としては、Zn-NiおよびZn-Fe合金めっきを施した鋼板がいち早く実用化されたことから、Zn-鉄族金属系に関する報告が基礎研究も含め数多く公表され、現在もその電析挙動について活発に論じられている。さらに、近年ではMnあるいはCrを含有するZn合金めっきについても関心が寄せられているのでそれらについても簡単に触れる。

(1) Zn-鉄族金属系

Zn-鉄族金属合金電析は、より卑な金属であるZnが鉄族金属に比べ優先析出する異常型共析となることが知られている。このZn-鉄族金属異常型合金電析の機構として広く知られているものに、Brennerの“添加剤理論”から発展した水酸化物抑制説がある。

福島らは、詳細な実験結果から、水酸化物抑制説に基づいて、Zn-鉄族金属合金の電析挙動をより体系的に説明している。まず彼らは、微小Sb電極を用い、異常型共析領域では、陰極近傍のpHはZn水酸化物の生成域まで上昇するがZn水酸化物生成によるpH緩衝作用のために鉄族金属の水酸化物生成pHまでは上昇しないこと、および正常型共析領域においてはpHの上昇は小さくZnの水酸化物生成域まで達し

ていないことを実証した。そして、生成したZn水酸化物が陰極上に吸着し、元来大きな析出過電圧を有する鉄族金属および水素が放電の活性点を奪われることによりさらに分極した結果、異常型共析が高電流効率で進行することを示唆した。また、彼らは電流密度の関数としてZn-鉄族金属電析挙動が下記の四つの領域に分類されることを示した。低電流密度域で正常型共析がおこる第Iの領域、転移電流密度を経て合金組成がほとんど変化しない異常型共析領域(領域II)、Znの析出が限界電流に近付き合金の鉄族金属含有率が再び増加する第IIIの領域、そしてZnおよび鉄族金属の双方の析出が限界電流密度下で起こり合金組成は浴中の金属イオン濃度比に等しくなる第IVの領域である。そして、領域IとIIの境界の電流密度(すなわち転移電流密度)は浴のpH緩衝能に比例し、さらに領域IIとIIIおよび領域IIIとIVの境界の電流密度はそれぞれ浴中の Zn^{2+} および鉄族金属イオンの濃度に依存することを示した。さらに、彼らは、水素および鉄族金属が本来有する大きな析出過電圧と析出抑制剤として作用するZn水酸化物によって生じる過電圧を導入し、上記の四つの領域の合金組成および電流効率の電流密度依存性を無理なく説明することに成功している。さらに、Zn-鉄族金属合金電析だけではなく純Zn電析においても水素の共析挙動が陰極上に吸着したZn水酸化物に大きく影響を受け、純