チタンクラッド鋼による海洋構造物の防食技術

田所 裕*, 本間 宏二*, 長谷 泰治*

A Corrosion Protection Method of Marine Structures with Titanium Clad Steel Plates

Yutaka TADOKORO*, Koji HOMMA* and Taiji NAGATANI*

Key Words : Titanium, Titanium Clad Steel, Splash Zone, Maintenance Free, Aesthetic Appearance

東京湾横断道路鋼製橋脚の100年耐久性を確保するために開発された、優れた耐海水腐食性を持つチタンクラッド鋼板による飛沫、干満部の新しい防食技術について解説する。

1. はじめに

内需拡大の動きもあって大型鋼構造物の建設需要は根強いものがある。この中にあって、恒常的な人手不足からくるメンテナンスフリーの要請、さらに構造物の長寿命化ニーズから、超長期を目標とした防食法がますます強くのぞまれている。この目的のために、従来、50年程度の寿命を一つの目安に高分子材料のライニングによる重防食技術が種々開発されてきた。しかし一般に高分子材料は長い期間に光や空気によって劣化し、100年程度の寿命を考えたときには、さらに高信頼性の材料が必要となってくる。この点から最近、高耐食性金属によるライニング防食が注目されてきている。

2. チタンおよびチタンクラッド鋼板

チタンは20世紀中頃に工業生産が開始された

新しい金属素材であり、耐食性はきわめて優れている。この耐食性は各種の化学プラントや温泉での熱交換器などで実証されているが、なかでも海水に対する耐食性は強固な不動態皮膜によって白金と同等である。事実、建設省土木研究所と鋼管杭協会や鋼材倶楽部が千葉沖や大井川沖で実施した実海洋暴露試験でも腐食は全く認められず、ステンレス鋼やモネルなどにみられる孔食や隙間腐食も全く発生していない。また貫い錆からの腐食の発生、溶接部、溶接熱影響部からの腐食発生の心配もない。

この特性を利用して、臨海発電所の海水冷却による復水器や海水淡水化プラントで数多く使用されており、これらの20年近い追跡調査でも腐食は全く認められていない。

チタンの物理的特性としては、比重は4.51で鋼の約60%、熱膨張は普通鋼、ステンレス鋼と比較して小さく、ヤング率は鋼の50%と小さいなどの特徴を有している。またその強度は酸素量によってJISで1種～3種に分類されるが、275～618N/mm²と普通鋼とほぼ同じである。

このようにチタンは耐海水腐食性に非常に優れている。しかし、海洋構造物の防食に使用するには、解決すべき課題としては大きく2つ考えられる。

まず第一に、いかにチタンと鋼構造物を接合するかといった接合法の問題である。ステンレス鋼やモネルなどが鋼と直接溶接が可能であるのに対

* 新日本製鐵(株)鉄鋼研究所 (〒299-12 千葉県富津市新富20-1)

Nippon Steel Corp. Steel Research Lab. (20-1, Shintomi, Futtsu-shi, Chiba 299-12)

図1 東京湾横断道路の鋼製橋脚（予想図）

し、チタンは鉄と直接溶接すると脆い金属間化合物を形成するため、実用的には鋼と直接溶接することはできない。このため、チタンと鋼を一体化したチタンクラッド鋼板を活用し、クラッド鋼の鋼部分と鋼構造物の本体を溶接接合し、表面のチタン部分を防食ライニングとする方法が考えられる。

第二はコストの問題である。従来、チタンクラッド鋼板は厚板しか製造されておらず、このようなライニングに使用するには板厚の面で無駄が多く、その製造方法では素材自体が高価であった。チタンクラッド鋼板の製造方法には、従来真空中でチタン板と鋼板を重ねたスラブ組立をおこない、酸化物の生成を防止して圧延する真空圧延法、および火薬の爆発力によりチタン板と鋼板を常温で機械的に接合する爆着法がおこなわれてきているが、いずれも製造にかかるコストが大きい。最近、チ

タン板と鋼板の間に銅板を挟み、大気中でスラブを組立て、普通鋼製造プロセスで熱間圧延された低コストのチタンクラッド鋼板が開発された。この製造法の特徴は、生成した酸化物を、低融点で液状になった銅とともに熱延しながら絞り出す点である。この製造技術によれば、耐海水ステンレス鋼などの高級高耐食ステンレス鋼なみのコストでチタンクラッド鋼薄板が製造でき、海洋土木分野において防食被覆材としてチタンクラッド鋼板が使用可能な状況となった。

3. 東京湾横断道路橋梁部の防食法

東京湾の中央部、川崎と木更津間約15kmを結ぶ東京湾横断道路（図1）は木更津側約5kmが橋梁で、その沖合部（水深20m）は航路確保と現地での工事期間の短縮のため、関西空港の連絡橋と同様に水中基礎工法が採用されている。

海洋に設置するという厳しい腐食環境にもかかわらず、重要な社会資本であるため耐用年数は50～100年が目標とされ、最新の防食技術の実施が要求された。

大気中部分の防食は厚膜エポキシ樹脂塗装+フッ素樹脂塗装であり、海中部分はタールエポキシ樹脂塗装+犠牲陽極による電気防食法で、いずれも補修を前提としている。

その両者の接点である飛沫、干満部では補修が不要で、流木や小型船舶などの衝突に耐え、さらに日本の表玄関としての景観を考慮したメンテナ

図2 飛沫・干満帯の100年対応の防食法

ンスフリーの防食法が強く要請された。

これまでの超長期の飛沫、干満部防食法として、関西空港連絡橋で採用された図2 (a)の方法は、樹脂ライニングで30年、犠牲鋼板(25mm)の腐食しろで55年、コンクリートで15年の計100年の耐食を期待する方法である。図2 (b)の方法は景観対策から提案されたもので、フッ素樹脂塗装と、樹脂ライニングで40年、犠牲鋼板で60年を期待する方法である。

これらに対し、図2 (c)がチタンクラッド鋼板による方法で、チタンクラッド鋼薄板を溶接ライニングし、表面のチタンで飛沫、干満部を防食する。チタンの耐海水腐食性から100年にわたる防食が期待できるとともに、金属ライニングのため耐衝撃性にも優れ、かつ表面も滑らかで景観上からも好ましい方法といえる。

ここで使用されるチタンクラッド鋼板は、異物の衝突による耐衝撃性、曲げ加工性、溶接性などについて十分な特性を有する、チタン1mm、鋼4mm、合計5mm厚の大中圧延法により製造されたクラッド鋼板である。ここにおけるチタンは、耐食性、機械的性質、施工性などから考慮されたJIS規格1種材である。

さらに、チタンクラッド鋼板を鋼構造物被覆防食材として適用するには、以下に述べる利用技術課題を解決することが前提となる。

- (1) チタンクラッド鋼板の橋脚本体への接合法およびクラッド鋼板継目端部シール法
- (2) チタンと橋脚本体との異種金属接触腐食の防止法
- (3) チタン表面の塗装法
- (4) チタンクラッド鋼板被覆防食法の長期防食性能の確認

チタンクラッド鋼による海洋構造物の防食法は初の試みであり、以下に東京湾横断道路(株)と新日本製鐵(株)が共同開発した防食技術について述べることとする。

4. チタンクラッド鋼板の接合法と端部シール溶接施工法

チタンクラッド鋼板を橋脚本体へ取り付けるに

図3 チタンクラッド鋼板の配置図

図4 本体鋼構造物とチタンクラッド鋼板の溶接法

際しては、チタンクラッド鋼の端部の異材溶接が必要不可欠になる。そのために上・下段部を図3に示すように“はちまき状”にチタンクラッド鋼を配置し異材継手部を極力少なくした施工法とした。

図4に鋼構造物本体との接合を示す。チタンクラッド鋼板の上下端部(飛沫部および海中部)は、チタンクラッド鋼のチタンと鋼材とが融合し脆化相が形成されるのを避けるため、クラッド鋼のチタン部分を5mmほど切り欠き、クラッド鋼板の鋼材部4mmと橋脚本体の鋼材をTIG溶接した。クラッド鋼の突き合せ部(中央部)では、開先を、60°とし、ルートギャップを3~5mmとし同質の溶加材を添加して橋脚本体の鋼材に取り付けた。その際、入熱を少なくし、スパッタなどによるチタン面への損傷を防ぐためにTIG溶接をおこなっ

図5 上下端部クラッドスペーサの溶接部分

た。また、鋼-鋼溶接部を表面に露出させないため2mm厚、35mm幅のチタン薄板で覆い、クラッド鋼のチタン部分とTIG溶接（隅肉またははなめ付け）によりカバーした。

しかし、チタンクラッド鋼の端部溶接部分（図3のB部）は隙間構造となり、海水中で毛細管現象により、継手部は海水に浸されクラッド鋼の母材部分が腐食される。よって、隙間部を完全密封することが必要である。ただし、その部分は異材溶接となることから特に施工法に工夫が必要である。チタンと鋼の異材溶接部を最小限にするため、上下端部は、図4の開先形状とし、および図5に示すクラッドスペーサを挿入し、接合部が線状になるようにしてAg-Cu-Snを主成分とした溶材を用いTIG溶接により密封した。

5. 異種金属接触腐食とその防止法

おおよそ海水中において、チタンやステンレス鋼などの普通鋼より高い電位の金属が接触すると、普通鋼の腐食が早められる現象、すなわち異種金属接触腐食がみられる。

チタンクラッド鋼板は鋼製橋脚と溶接接合された後、橋脚本体の普通鋼露出部全面を塗装すれば異種金属接触腐食はおこりにくい。しかし長時間

図6 人工海水中におけるチタンと鋼の異種金属接触腐食および電気防食の効果

経過後には、①塗装の局部的はく離、②流木や船舶の衝突による表層チタン板の損傷、などにより普通鋼が露出する状況がおこりえないとはいえない。また、その状況においてチタンと炭素鋼の露出面積の比率によっては普通鋼の腐食がかなり早められ、橋脚の耐用年数が著しく低下することが懸念される。そのため、異種金属接触腐食の防止対策を施す必要がある。そこで、チタンクラッド鋼板がライニングされる飛沫部、干満部、海中部の腐食環境を模擬した室内試験により異種金属接触腐食現象を把握し、防食対策として従来海洋鋼構造物の防食に用いられてきた流電陽極法による防食効果について評価した。その結果、図6に示すように海中部においては、チタン／普通鋼の面積比が増大するに伴って腐食速度の大きな増加がみられたが、電気防食によって、異種金属接触腐食が防止できることがわかった。

また、電気防食の効果は干満部においてもみられ、万一の事故によりチタン面に局部的な破損が生じても海中の電気防食の効果により腐食が抑制されることを確認した。また、飛沫部においては、チタンとの接触において特に鋼の腐食が促進されることがないことがわかった。

また、チタンクラッド鋼ライニングの上端部すなわち大気中のチタンと鋼の接点においては、上部の大気にさらされている鋼部分へのエポキシ樹脂塗装+フッ素樹脂塗装をチタン部分の上に250mm重ね塗装することにより端部を保護する方法とした。

図7 東京湾横断道路の概要

さらに海中部の異種金属接触腐食の防止については電気防食が不可欠であるため、チタンと鋼が共存する複雑な形状の実構造物において、犠牲陽極の数量および配置に関し、どのように電気防食設計すればよいかについて数値解析によるシミュレーションを行い、実構造物における電気防食設計指針を確立した。

6. チタンクラッド面への塗膜の密着性

一般にはチタンはその優れた耐食性から塗装せずに用いられるが、チタンクラッド鋼ライニングとして使用する場合は普通鋼とチタンとの境界部の防食及び景観から構造物に着色するために塗装することが必要となる。

そこで、新たにチタンへの塗装仕様について検討をおこなった。塗装仕様として、素地調整を鋼面と同様なサンドブラスト処理し、エポキシ樹脂塗料を下塗りとし、表面をフッ素樹脂塗料とし、その一次物性（塗装後 20℃ 7 日間養生）、二次物性（40℃ 3% 食塩水に 1 ヶ月～1 年浸せき）を共に基盤目試験、アドヒージョン試験により評価したところ、チタンと鋼の密着性差は認められず、良好な密着性が得られることがわかった。

7. 海洋暴露試験による長期特性の検証

以上の室内試験の結果から、チタンクラッド鋼を適用するにあたって、チタンと鋼が接する境界部やチタンが万一損傷を生じた部分に対して、異種金属接触腐食の防止策が必要であり、その方法として、海中部および干満部では電気防食が有効であることが示唆された。また、飛沫部では異種

金属接触腐食の影響は小さいこと、および、チタンへの塗膜付着性も確保されることから、塗装の適用が可能であることが示された。

しかしながら、実構造物への適用には、構造物レベルでの実際の海洋環境における性能の確認が必要である。そこで、チタンクラッド鋼板によって被覆した鋼管杭を平成 2 年 4 月より 5 年間の予定で、横断道路の計画に隣接する新日本製鐵(株)君津製鉄所の東岸壁（水深約 11m）において暴露し、綿密な観察とともにチタン表面の電位、犠牲陽極発生電流などの経時変化を測定し防食性能の確認を行っている。1 年経過後の調査において腐食、塗膜劣化など全くなく、100 年耐用に向けての予想通りの防食性能を示している。

図8 チタンクラッド鋼板による防食被覆を施した東京湾横断道路鋼製橋脚

8. 東京湾横断道路鋼製橋脚への適用

以上、チタンクラッド鋼ライニングについて、その接合技術、異種金属接触腐食防止技術、塗装技術の検討に加え、さらに海洋暴露試験を行い、実用化への目処を得たことから、東京湾横断道路の鋼製橋脚へ採用されることとなった。適用箇所は図7に示すように木更津人工島と木更津を結ぶ橋梁の沖合い部鋼製橋脚で全12基である。鋼製橋脚は図8に示すような脚柱とフーチング部から成るもので一基あたり1000~2000トンに達する(橋脚ごとに異なる)。この鋼製橋脚を予めファブリケーションヤードで製作し、チタンクラッド鋼ライニング、電気防食用犠牲陽極取付、塗装などの防食措置を行った後、フローティングクレーンにより現地へ曳航し、予め打設した鋼管杭上に設置し、水中不分離性コンクリートにより結合する方式をとっている。平成4年6月現在では、鋼製橋脚3基が完成し(橋脚番号P7; 図8, P10, P8) 現地据え付けを完了している。

9. おわりに

このたびの東京湾横断道路での本工法の施工は海洋、土木工事へのチタン防食の本格採用の第一歩であり、鋼構造物のメンテナンスフリーの超長期防食法が開発されたといえる。

このチタンクラッド鋼薄板によるライニング法以外にも、有機防食材(ペトロラタム)との複合防食法が既設鋼管杭の飛沫、干満部の防食法として、平成2年に北九州港門司地区で施工された。さら大気中の防食法としてチタン箔(厚さ100 μm)と粘着材との複合による鋼構造物やコンクリート構造物の防食についての暴露試験が開始されている。

このようにチタンを使ったメンテナンスフリーを目指す海洋構造物の超長期防食技術の開発には、大きな期待が寄せられつつある。その防食技術においては、チタン素材の加工・施工法および異種金属接触腐食の防止がポイントとなると考えられる。これらはまだ新しい技術であり、今後実績とともに詳細な技術指針の確立が急がれるところである。さらに超長期防食のためには単に材料に依存するのみならず、自動腐食モニターの開発など周辺技術の完備も企ててこそ高信頼性の技術となるものと考ええる。

最後に本防食技術についてのさらに詳細な報告については、参考文献を参照していただきたい。

(1992-7-2 受理)

文 献

- 1) 香川祐次, 中村俊一; 土木学会論文集, No.435/VI-15, p.69-77, p.79-87 (1991)