

連携記事

海洋構造物の信頼性を守る鉄－3

耐海水性ステンレス鋼被覆による 海洋鋼構造物飛沫帯の100年防食技術

100-Year Durable Corrosion Prevention Technology for Marine Steel Structures
Using Seawater Resistant Stainless Steel Sheet Sheathings

新日鉄エンジニアリング（株） 技術開発研究所
防錆・防食技術室 室長

鈴木恵太

Keita Suzumura

JFE エンジニアリング（株） 総合研究所
材料研究部

北川尚男

Takao Kitagawa

1 はじめに

海洋鋼構造物は、設計自由度が高く、現地施工期間が短い等、多くの利点がある。ただし、海洋構造物は、たいへん厳しい腐食環境に設置されメンテナンスも容易でないことから、長期防食対策が不可欠である。本報では、特に腐食の厳しい飛沫・干満帯においても100年の設計耐用を有する耐海水性ステンレス鋼を被覆する技術について述べる。そして本技術が適用された羽田空港再拡張事業についてその概要を紹介する。

2 海洋構造物の防食技術の変遷

海洋構造物が設置される環境は、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部に分類され、そこに設置された鋼材の腐食は模式的に図1のようになることが知られている。特に腐食が厳し

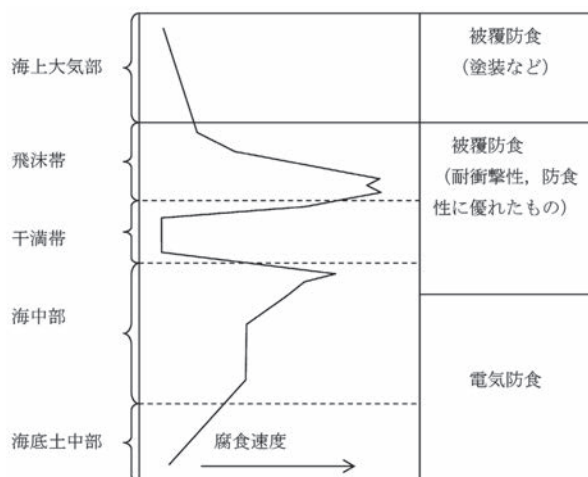


図1 鋼矢板の腐食速度と金属被覆の適用範囲

いのは、飛沫・干満帯である。これは、干満や波浪、飛来塩分の影響により酸素を多く含んだ水膜が鋼材表面に形成されやすいためである¹⁾。

海洋環境における防食方法として、海中部には電気防食を適用するのが一般的である。電気防食とは、電気伝導性がある海水にある鋼材に外部から電流を供給して防食する方法である。防食電流の供給方法として、アルミ合金など鋼よりも電位が卑な金属を取り付ける流電陽極方式と、電源により防食電流を供給する外部電源方式がある。

飛沫帯や干満帯では、電気防食では防食できないため、鋼材を被覆することにより腐食環境から遮断して防食する被覆防食が適用される。被覆方法として最も汎用的に用いられるのが塗装である。塗装はエアレススプレーなどにより被覆するため被覆形状に自由度があり比較的安価であることから広く適用されている。ただし、飛沫・干満帯は、厳しい腐食環境であることから、陸上の大気環境向けの防食塗装では早期に劣化してしまうため、防食性能に優れた約500 μ m膜厚をもつ海洋塗装系や約2mmの膜厚をもつ超厚膜形エポキシ樹脂被覆工法などが開発されてきた。また、鋼管杭や鋼管矢板では、工場でポリエチレンや厚膜ポリウレタン材料を約2mm厚みで被覆した製品が広く適用されている。これらの有機材料による被覆は、実績や長期暴露試験から、海洋塗装系では20年程度、超厚膜エポキシ樹脂被覆や工場ポリエチレン被覆では40年程度の期待耐用年数があると考えられている^{1,2)}。

しかし、これらの有機材料を用いた防食被覆は、長期的にみると材料の劣化と防食性能の低下が懸念される。また、浮遊物との接触や外力により被覆に損傷を生じることがあり、こまめにメンテナンスを実施していくことが必要となる。

昨今、ライフサイクルコスト（Life Cycle Cost: LCC）の観点から50年以上の長期耐久性が要求される海洋構造物に対し、

耐食性金属を被覆として用いた構造物が登場してきた。有機被覆に比して、被覆の強度が高く、劣化の懸念もないことからメンテナンスを低減できるためである。耐食性金属としては、チタンやステンレス鋼が挙げられる。

東京湾横断道路の橋脚には薄板チタンクラッド鋼を用いた金属被覆工法が適用された³⁾。チタンは海水中において腐食の心配がなくメンテナンスコストが大幅に低減できるが、材料費と施工費が高価であるため適用が限られていた。

チタンよりも安価なステンレス鋼被覆についても、海水環境でも優れた耐食性能を有する材料を用いることにより、長期にわたり被覆損傷の懸念がなく、メンテナンスを低減できることが30年間の長期暴露試験から確認されている^{4,5)}。ただし、それでも高価であったため、適用は限定されていた。

耐海水性ステンレス鋼被覆工法は、従来の金属被覆工法と比較して材料の薄肉化によるさらなる低コスト化、高施工効率化により大幅なコストダウンを実現した防食技術である。

3 耐海水性ステンレス鋼

ステンレス鋼で、最も汎用的なものはSUS304およびSUS316である。これらの材料は、耐食性（耐発錆性）に優れることから建材など広く適用されている。しかし、飛沫帯、干満帯や海水中では孔食やすきま腐食を発生しやすい。

耐海水性ステンレス鋼は、汎用ステンレス鋼であるSUS304あるいはSUS316に比較してクロム、モリブデン、窒素などの耐食性合金元素量を大幅に増加させて飛躍的に耐食性を向上させた材料である⁶⁾。

ステンレス鋼の耐食性を示す指標として、孔食指数（Pitting Index：PI）がある。この指数はCr（クロム）、Mo（モリブデン）、N（窒素）の含有量に係数を掛けて、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、 $PI = Cr\% + 3.3 \times Mo\% + 16 \times N\%$ で算出される。この指数が大きいほど耐食性に優れる。SUS304はPIが約19、SUS316では約23である。

促進試験や暴露試験などの既存研究から、PIが40以上であれば、海洋環境でも十分な耐食性を示す結果が得られている。耐食性をはじめ機械的性質、加工性に優れた耐海水性ステンレス鋼としてSUS312Lに着目した。SUS312Lの成分は表1に示すように、20Cr、6Moを含む、高Nオーステナイト系耐海水性ステンレス鋼であり、そのPIは42である。

SUS312L、SUS304およびSUS316Lの耐食性を、飛沫帯模擬シャワー試験により調査した。図2に4ヶ月目の外観を、図3に孔食深さとPIとの関係を示す⁷⁾。SUS312Lは、飛沫帯を模擬した厳しい腐食環境下でも優れた耐食性を示すことがわかる。

表1 SUS312Lの成分

鋼種	成分（%）									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS312L	<0.02	<0.8	<1.0	<0.03	<0.015	17.5 ～19.5	19.0 ～21.0	6.0 ～7.0	0.5 ～1.0	0.16 ～0.25

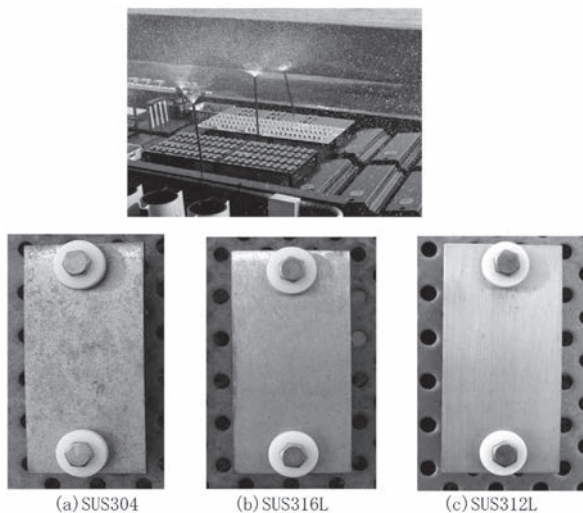


図2 飛沫帯模擬シャワー試験4ヵ月後のステンレス鋼の外観

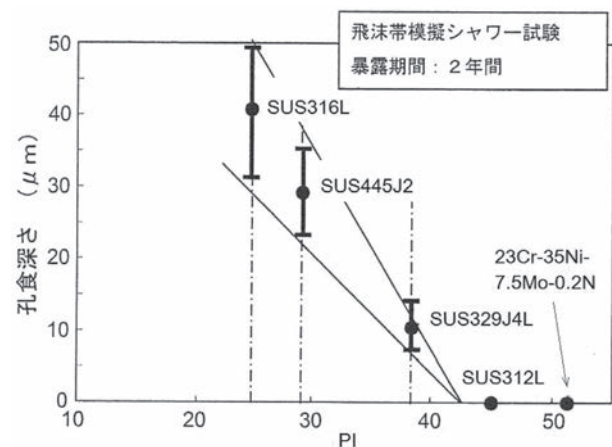


図3 孔食深さと孔食指数との関係

4 耐海水性ステンレス鋼被覆

4.1 耐海水性ステンレス鋼被覆の概要

耐海水性ステンレス鋼は高価であるため、薄板で被覆できれば経済的である。特に、SUS312Lはその優れた耐食性から腐食による減肉を見込む必要がないため薄肉化が可能である。耐海水性ステンレス鋼は、材料同士および鋼材とのラップ部を溶接により接合することが可能であるが、TIGなどのアーク溶接では、0.8～2mm程度の厚みが必要となる。これは、ステンレス鋼は熱伝導率が炭素鋼に比べて小さいため被覆材中の熱拡散が遅く、板厚が薄くなると溶け落ちや穴あきが発生しやすくなるためである。

耐海水性ステンレス鋼被覆は、その被覆費用を低減するために、ステンレス鋼の薄肉化と溶接能率の向上が必須であった。それを実現するために、図4に示す抵抗シーム溶接技術を応用したインダイレクトシーム溶接法を開発した^{8,9)}。インダイレクトシーム溶接とは被溶接物上の電極輪間にパルス電流を流し、電極輪を移動させることで連続した接合を行う溶接法である。鋼材とステンレス鋼シートの接触面は、通電時の抵抗発熱により部分熔融して接合される。インダイレクトシーム溶接は、構造物の片面から溶接が可能であり、溶接時の熱を適切に拡散させるため、0.4～0.6mmの板厚でも施工が可能となった。また、シートの溶接端部のすきまは、すきま腐食の原因となるため、溶接でシールすることが必要である。そのため抵抗溶接後に、シート端部をプラズマ隅肉アーク溶接によりシールしている。アーク熱は、抵抗溶接部を介して裏面の炭素鋼材に拡散させることにより、薄肉ステンレス鋼でも溶け落ちや穴あきを防止している。図5に耐海水性ステンレス鋼被覆の被覆構造を、図6に耐海水性ステンレス鋼被覆設備の外観を示す^{8,9)}。

4.2 耐海水性ステンレス鋼被覆の特徴

耐海水性ステンレス被覆工法は、鋼材をSUS312Lなどの耐海水性ステンレス鋼で覆い、周囲を溶接し、鋼材を腐食環境

から遮断する防食方法である。耐海水性ステンレス鋼を被覆した構造物は、以下に挙げる特徴により、長期にわたり鋼材の腐食を確実に防食できる。

- ・新たに開発したインダイレクトシーム溶接法により、従来の耐食性金属被覆に比して、格段に低コストでの施工が可能である。
- ・工場で被覆施工するため、品質の安定化と現地での工期短縮を図れる。
- ・防食対象部は耐海水性ステンレス鋼被覆により確実に密封されるため、腐食環境から完全に遮断することができる。
- ・優れた耐衝撃性、耐食性、疲労特性を有しており、被覆が損傷する可能性が極めて低い。
- ・万が一損傷した場合も補修可能である。

5 耐海水性ステンレス鋼被覆の性能

5.1 耐衝撃性

海洋構造物の飛沫・干満部では、船舶や漂流物の衝突によ

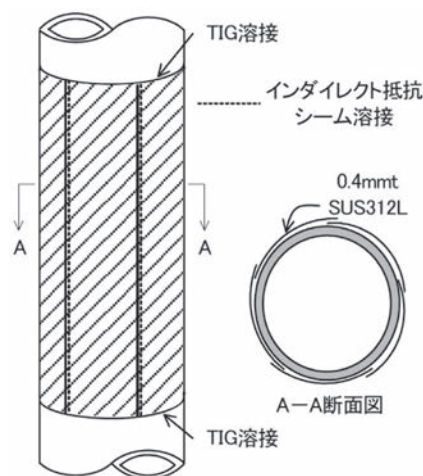


図5 耐海水性ステンレス鋼被覆の構造概略図

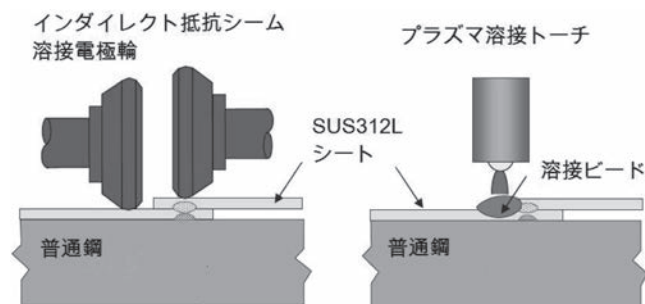


図4 溶接方法の概要

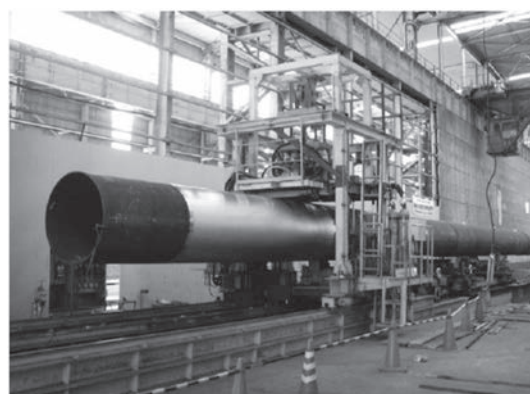


図6 耐海水性ステンレス鋼被覆設備の外観

り防食被覆が損傷する可能性がある。被覆の耐衝撃性を評価するために、図7に示す衝撃試験を実施した⁸⁾。厚さ0.4mmのSUS312Lを被覆した普通鋼板に1kJの衝撃エネルギーを加えた場合でも平面部、溶接部ともに貫通は発生しなかった。一般的に使用されている、重防食塗装系や数mm厚のポリエチレン被覆と比較すると格段に優れた耐衝撃性を示すことがわかる。

5.2 疲労特性

耐海水性ステンレス鋼を被覆した材料の溶接部の疲労特性について検討した。表2にSUS312L材の機械的性質の規格値と代表例を示す。SUS312LはSUS304、SUS316の約1.5倍の耐力を有する。また、高硬度であり耐衝撃性、耐摩耗性も優れる。

さて、シーム溶接部には風波による繰返し外力が作用することから、溶接部（被覆材板厚0.5mm）の疲労試験を、部分片振り（応力比：0.1）、周波数：10Hz、応力振幅制御として実施

した。図8に疲労試験により得られたS-N線図を示す。シーム溶接部の疲労特性は、疲労設計指針の疲労設計曲線（せん断応力を受ける継手）にて、A等級継手とほぼ同等の疲労特性を有していた。A等級継手の疲労特性は表面を機械仕上げした帯板（表面、および端面、機械仕上げ）と同等である⁸⁾。

5.3 防食性

SUS312Lを中心とした耐海水性ステンレス鋼を海洋構造物に適用した事例について、表3にまとめた。福山地区、波崎海洋観測栈橋、大井川沖の海洋技術総合研究施設での暴露試験の結果から、ステンレス鋼被覆工法は長期耐久性が証明され、大井埠頭コンテナバース、博多港コンテナバースなどに採用された。既に10年以上の実績があり、優れた耐食性が確認されている。

5.4 異種金属接触腐食の対策について

耐海水性ステンレス鋼被覆を適用する場合、海中部の鋼材との異種金属接触腐食を防止するため、電気防食工法を併用することが不可欠である。

したがって、電気防食を設計するにあたり、耐海水性ステンレス鋼被覆にどのくらいの防食電流が流入するか把握しておく必要がある。海洋構造物や干満帯を模倣する実験設備において、耐海水性ステンレス被覆に流入する電流量を

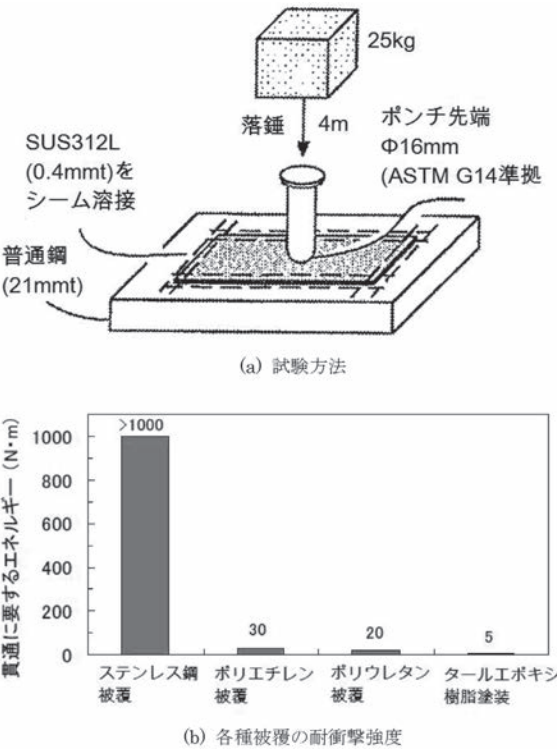


図7 衝撃試験

表2 SUS312Lの機械的性質

	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張破断強度 (N/mm ²)	引張破断伸び (%)	硬さ (Hv)
規格	≥350	≥650	≥35	
例	461	843	39	192

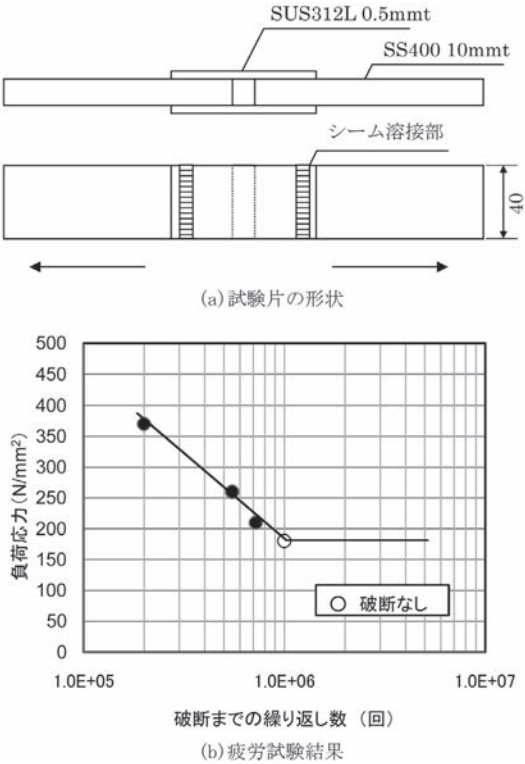


図8 溶接部の疲労試験

計測し、海中で鋼材に流入する電流量とほぼ同等であることが確認された^{10,11)}。そして、電気防食工法を併用することにより、海中部の普通鋼の異種金属接触腐食は発生せず、確実に防食されていた。

6 羽田（空港）D滑走路
ジャケットレグ部への適用

6.1 羽田空港再拡張事業の概要

羽田空港では、首都圏における航空需要の増大に対応するため、現空港の沖合に新たに4本目の滑走路となるD滑走路が建設された。D滑走路は埋立・栈橋の組み合わせ構造が採用されており、栈橋部は、多摩川河口域に建設されることから、河川流の通水性を確保するためにジャケット式鋼構造物が適用されている（図9）¹²⁾。

ジャケット式鋼構造物は、図10に示すように、鋼桁から成るデッキ部、鋼管トラスのジャケット部、ならびにこれらを支える鋼管杭から構成される。地盤に深く打込まれた杭に、鋼製のジャケットを設置するため、埋立工法と異なり地盤沈下がなく、地震等に強い構造である。また、海洋に大型の浮体を浮かべたメガフロート方式と異なり潮汐や風、波による動揺がない。さらに川の流れを妨げず、水面を閉塞しないため酸素が海中に溶け込み易く、海洋生物への影響も小さいと言われている¹²⁾。

空港島全体約150万m²のうち、多摩川側約1,100m、約52万m²の栈橋は198基のジャケットで構成されている。標準的なジャケット1基の大きさは63m×45mで6本の鋼管レグで支持される。ジャケット1基あたりの重量は約1,650トンである。

6.2 栈橋部の防食構造

栈橋部は厳しい腐食環境であり、100年対応の防食設計が行われた。その防食仕様は、図10に示すように、飛沫干満部に耐海水性ステンレス鋼被覆、軒下部はチタン製のカバープレートで覆う構造、内部はエポキシ樹脂系塗装と除湿¹³⁾が適用されている。海中部については、アルミ合金アノードによる電気防食が行われている¹²⁾。



(a) 羽田空港 D 滑走路 栈橋部



(b) レグ部への耐海水性ステンレス鋼被覆

図9 羽田空港D滑走路栈橋部 レグへの耐海水性ステンレス鋼被覆

表3 耐海水性ステンレス鋼被覆の適用実績（例）

施設名	場所	施設目的	設置時期
絵鞆漁港物揚場栈橋	北海道室蘭市	栈橋	H09
南風泊漁港沖防波堤	長崎県高島町	杭式防波堤	H10, H11
大津島（馬島）漁港防波堤	山口県徳山市	杭式消波堤	H11, H12
境漁港栈橋	鳥取県境港市	物揚場栈橋	H11, H14
富津火力発電所第2LNG パース	千葉県富津市	LNG 受入パース	H11
佐賀関漁港防波堤	大分県佐賀関町	杭式防波堤	H13
大井埠頭新5 パース	東京都	コンテナ栈橋	H14
大坂港夢洲トンネル立坑	大阪府大阪市	沈埋トンネル立坑	H14
北九州第二島埠頭	福岡県北九州市	栈橋	H14
北九州港川代埠頭	福岡県北九州市	栈橋	H14
博多港（アイランドシティ地区）岸壁	福岡県博多市	栈橋	H19

6.3 耐海水性ステンレス鋼被覆の施工

栈橋部レグ部に被覆される耐海水性ステンレス鋼被覆は、荒川工事基準面 (A.P.) - 1.5m からレグの上端部までの8 ~ 11m からおよそ A.P. - 1.5m の範囲であり、工場製作段階で、鋼管部材に厚み0.4mmの耐海水性ステンレス鋼 (SUS312L) を被覆した。レグの本数は1201本であり、被覆総面積は69,000m²、耐海水性ステンレス鋼の使用量は約250トンである。

施工手順としては、①耐食性ステンレス鋼被覆が溶接される鋼管の表面処理、②溶接、③溶接後の処理、④検査を行った。

溶接は、0.4mmの耐海水性ステンレス鋼を4.1節で述べたインダイレクトシーム溶接+プラズマアーク溶接を用いて被覆する方法が適用された⁹⁾。溶材はニッケル合金溶加棒 (JIS Z 3334 YNiCrMo-3) を用いた。溶接部の表面に生成した酸化皮膜が耐食性を低下させる恐れがあるため、溶接部については、電解研磨もしくは砥粒入りナイロン不織布ブラシを用いた電動工具等による研掃を行った。検査は、外観の他、気密性を確認するため浸透探傷試験やリークテストを実施した。

6.4 維持管理

羽田空港D滑走路における耐海水性ステンレス被覆の維持管理は、予防保全とライフサイクルコストを考慮した計画となっている。具体的には、1年に1回、全レグを対象に耐海水性ステンレス鋼被覆の変形、損傷、腐食がないことを、目視で点検する。そして特定のレグについては5年、15年、30年目に干満帯~海中部の付着生物を除去して点検する詳細点検を実施する。そして30年目以降は調査結果を考慮して今後の調査頻度を見直す計画である¹⁴⁾。

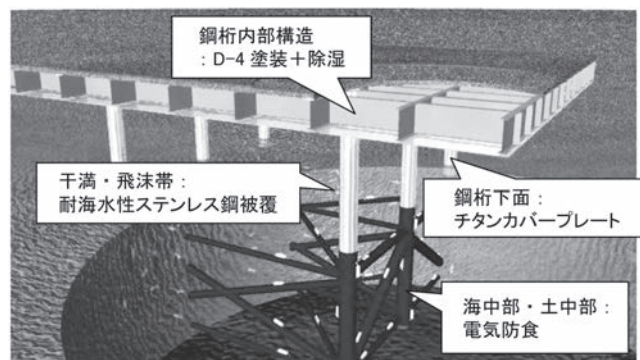


図10 羽田空港D滑走路栈橋部の防食構造

7 おわりに

海洋空間を有効活用する海洋構造物には、長期耐久性と優れた経済性を有する防食設計を行うことが不可欠である。今回紹介した耐海水性ステンレス鋼被覆は、防食性に優れた金属材料を少ないコストで被覆することにより、長期供用時のLCCをミニマムにできる技術である。

現在、羽田空港再拡張事業をはじめ、多くの海洋鋼構造物の防食方法として実績を重ねている。今後も実構造物のフォロー、施工法のさらなる改善を行い、防食信頼性と経済性を両立する防食方法として、技術の構築を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル (2009年版), (財) 沿岸技術研究センター.
- 2) 阿部正美: 材料と環境, 60 (2011), 3-8.
- 3) 田所裕, 本間宏二, 長谷泰治: 表面技術, 43 (1992) 10, 901-906.
- 4) 玉田明宏, 藤田栄, 清水義明, 庄司憲夫: 材料と環境, 41 (1992.2) 2, 89.
- 5) 村瀬正次, 京野一章: 防錆管理, 52 (2008.3) 3, 81.
- 6) 海洋鋼構造物の防食Q&A, (社) 鋼材倶楽部編, 技報堂出版 (株), (2001), 130.
- 7) 阿部正美: 腐食防食協会 第155回腐食防食シンポジウム資料, 27-35.
- 8) 河合康博, 石見博志, 佐藤弘隆, 馬場則光: 新日鉄技報, 385 (2006), 86-90.
- 9) 海洋構造物への薄板ステンレス被覆の溶接施工技術, 新日鉄エンジニアリング技報, 2 (2011), 81-82.
- 10) 佐々木信博, 佐藤弘隆, 石田雅巳, 阿部正美: 防錆管理, 46 (2002) 3, 6-11.
- 11) 北川尚男, 轟原誠, 玉田明宏, 若菜弘之, 朝倉祝治: 材料, 59 (2010) 2, 137-142.
- 12) 石田雅巳, 佐藤弘隆, 関口太郎, 野口孝俊, 鈴木紀慶: 防錆管理, 51 (2007) 11, 551-557.
- 13) 加藤真志, 安藤誠, 橋本光行: JFE技報, (2004) 5, 67-71.
- 14) 佐藤弘隆, 関口太郎, 野口孝俊, 鈴木紀慶: 防錆管理, 55 (2011) 2, 49-56.

(2011年11月15日受付)