

海洋構造物防食ライニングへの高耐食ステンレス鋼の適用開発

Development of Metallic Sheathing for Protection of Offshore Steel Structure Using Seawater Resistance Stainless Steel

佐藤 弘隆^{*(1)}
Hiroataka SATO
河合 康博^{*(1)}
Yasuhiro KAWAI

石田 雅己^{*(2)}
Masami ISHIDA
高橋 陽一^{*(3)}
Yoichi TAKAHASHI

金井 久^{*(2)}
Hisashi KANAI
盛高 裕生^{*(4)}
Hiroo MORITAKA

岩見 博志^{*(1)}
Hiroshi IWAMI

抄 録

海洋鋼構造物は厳しい腐食環境下に置かれるため、信頼性の高い防食法を適用することが重要である。近年、構造物の期待供用年数は長期化しており、構造物のライフサイクルコスト評価に対する関心が高まってきている。そこで、信頼性が高く経済性に優れた金属ライニングを海洋構造物の防食法として新たに開発した。耐海水性ステンレス鋼をインダイレクトシーム溶接法によって構造物と接合している。従来の金属ライニングと比較すると、インダイレクトシーム溶接法は材料コストと施工コストを低減できる。耐海水性ステンレス鋼ライニングは優れた耐食性、耐衝撃性、疲労特性を有していることを実験により確認した。

Abstract

The offshore steel structures are subjected to severe corrosive environment, it is important to apply reliable corrosion protection methods. In recent years, the extended life of structures is expected, therefore the evaluation of the life cycle cost has become a growing interest. A new reliable and economical metallic sheathing for protection of offshore steel structures has been developed. The seawater resistance stainless steel sheets are welded to the structures by the indirect seam welding method. Compared with conventional metallic sheathings, this welding method reduces the material and fabrication costs. The experimental results of the stainless steel sheathing indicate good corrosion resistance in seawater, good impact resistance and good fatigue properties.

1. はじめに

栈橋や防波堤といった海洋構造物は重要な社会資本である場合が多く、長期の耐用年数が求められる。鋼材を主材料とした海洋鋼構造物は、均質で安定した材料、溶接による確実な接合、短期間での施工、設計の自由度が高い等、多くの利点がある。ただし、海洋は鋼材にとって厳しい腐食環境であるため、海洋鋼構造物には腐食対策が不可欠となる。特に飛沫・干満部は、最も腐食が激しく、電気防食の適用も困難なため、海洋鋼構造物の機能維持には、飛沫・干満部に信頼性の高い防食法を適用することが重要である^{1,2)}。

飛沫・干満部の腐食対策としては、環境遮断効果を有する材料で鋼材を被覆する被覆防食法が広く適用されている。被覆材料としては、各種有機塗料やポリエチレン樹脂、繊維強化プラスチックといった有機材料が一般的である。有機材料による被覆防食は、初期コストが比較的安価であり、複雑形状部への適用も容易であるため優れた防食法と言える。ただし、漂流物の衝突による損傷や、材料自体の経時劣化等により、水、酸素等の腐食因子と鋼材との接触を

長期間阻止することは困難である。そのため、構造物の供用年数が長期化すると、防食被覆の補修や更新といったメンテナンスに多大なコストが必要となる。

50~100年といった超長期の耐用年数を期待される海洋鋼構造物で

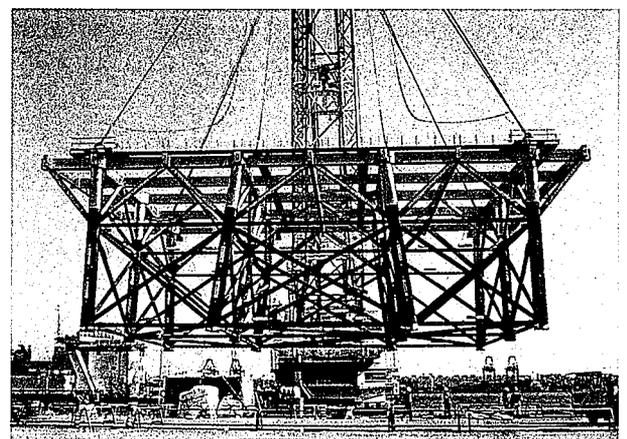


写真1 耐海水性ステンレス鋼ライニングの適用例(ジャケット式栈橋)

*⁽¹⁾ 相模原技術開発部 マネジャー
神奈川県相模原市西橋本5-9-1 ☎229-1131 ☎042-771-6131

*⁽²⁾ 相模原技術開発部 グループリーダー

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 営業部 マネジャー

*⁽⁴⁾ 鉄構海洋事業部 部長(現(株)テトラ)

は、耐食性金属ライニングによる防食が適用される場合もある^{3,4)}。耐食性金属ライニング防食法は、耐食性や耐衝撃性に優れたチタンやステンレス鋼等の耐食性金属を鋼材に被覆し、完全に環境遮断する防食法である。供用期間中の補修がほとんど不要となるため、メンテナンス費用が低減できる。ただし、材料費を含めた施工コストが重防食塗装等に比べて高いため、適用箇所が限られていた。

そこで、信頼性の高い防食法である耐食性金属ライニングの施工コスト低減を目的として、耐海水性ステンレス鋼ライニング防食法を開発した(写真1参照)。本報では、耐海水性ステンレス鋼ライニングの概要について報告する。

2. 耐海水性ステンレス鋼ライニング防食工法の特徴

本防食法は、鋼材を新日本製鐵の耐海水性ステンレス鋼 YUS270⁵⁾(20Cr-18Ni-6Mo-0.2N-LC)で覆い、周囲を溶接することにより鋼材を腐食因子から遮断する防食法である⁶⁾。YUS270をライニングした海洋鋼構造物は、

- ・新しく開発したインダイレクトシーム溶接法により従来の金属ライニングよりも格段に低コストで施工が可能である
- ・工場にてライニング施工されるため、品質の安定と現地での工期短縮を図ることができる
- ・防食対象部はステンレス鋼シートによって密封されるため、腐食因子の浸入を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、ライニングが損傷を受ける可能性が極めて低い
- ・万一損傷した場合も、補修可能である

等の特徴により、長期にわたり鋼材の腐食を防止することができる。

3. 耐海水性ステンレス鋼ライニングの施工方法

3.1 耐海水性ステンレス鋼ライニングの適用範囲

海洋鋼構造物が置かれる海洋の腐食環境は、図1に示すよう鉛直方向に、海上大気部、飛沫部、干満部、海中部、海底土中部と大きく五つに区分できる。最も腐食速度が大きくなるのは、飛沫部、干満部である。波浪や干満の影響により酸素、塩分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。

耐海水性ステンレス鋼ライニングは、海上大気部、飛沫部、干満部及び海中部の一部に適用する。海中部及び海底土中部は、経済性に優れ、信頼性も高い電気防食工法を適用している。

3.2 インダイレクトシーム溶接法について

ライニングに用いているYUS270は自然海水に対して十分な耐食性を有しているため、腐食しるは実質不要である。そこで屋根材で

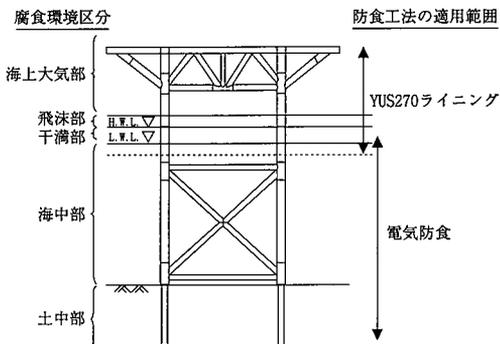


図1 海洋鋼構造物の腐食環境区分とYUS270ライニングの適用範囲

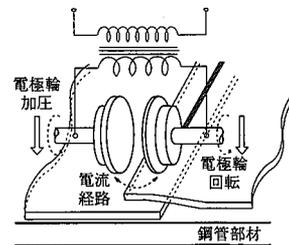


図2 インダイレクトシーム溶接の概念図

広く流通している0.4mmのYUS270シートを安定して溶接するためにインダイレクトシーム溶接法を開発した。インダイレクトシーム溶接とは、図2に示すように、2枚の円盤状電極(電極輪)を移動させながら、電極輪間に電流を断続的に流すことで連続した接合を行う溶接法である。加圧された電極輪間に短時間、大電流を通電することで、鋼材とステンレス鋼シートが接触面の抵抗発熱により部分熔融して接合される。従来のTIG溶接によるライニングと比較すると、

- ・TIG溶接では溶損防止のため1.5mm程度の板厚が必要であるが、板厚0.4mm程度の薄い板厚でも安定した溶接が可能である
- ・接合速度が1m/min程度とTIG溶接よりも高能率である
- ・オペレーターの操作により自動溶接が可能である
- ・抵抗溶接のため溶接材料が不要である

といった長所を有しており、材料費低減及び高能率化により、TIG溶接よりも大幅な施工コストの低減を実現している。

3.3 耐海水性ステンレス鋼ライニングの適用板厚

インダイレクトシーム溶接が適用できる鋼管やボックス構造の直線部といった単純形状部では、0.4~0.6mm程度の板厚を適用することで材料費の低減を図っている。複雑形状部では通常のTIG溶接により1.5mm程度のYUS270をライニングしている。なお、単純形状部についても、船舶の衝突等の懸念があり、更なる高強度化が要求される場合は1.5mm程度の板厚材の適用を推奨する場合もある(表1参照)。

3.4 単純形状部の施工方法

鋼管部材へのYUS270のライニング要領を図3に示す。YUS270シートで防食対象部を覆い、YUS270シートの重ね合わせ部及び上下端部をインダイレクトシーム溶接により接合する。更に、ライニング上下端部は、YUS270シートの重ね合わせ部の水密性を確保するため、TIG溶接を行い密封シールする。ライニング後は鋼管内面から鋼管-ライニング間にエアを注入し、リーク試験を実

表1 耐海水性ステンレス鋼ライニングの板厚

耐海水性ステンレス鋼ライニング適用部位	YUS270板厚
単純形状部	0.4~0.6mm程度
複雑形状部及び要高強度部	1.5mm程度

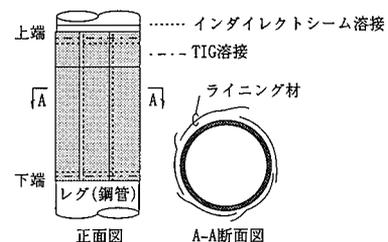


図3 鋼管部材へのYUS270のライニング要領

施することで接合部の健全性を確認している。

H形鋼等へのライニングは、予めH形鋼のフランジ間にカバープレートを溶接してボックス形状にして、その外側にYUS270シートをインダイレクトシーム溶接によりライニングしている。

なお、現仕様ではインダイレクトシーム溶接部についてはシーム溶接後にTIG溶接を行っている。0.4mm程度の薄板のTIG溶接は、シートが溶損しやすく適用困難であったが、シーム溶接のビードを通じて溶接時の熱が鋼材へと拡散するため適用可能となった。このTIG溶接の併用により、異物が堆積しやすく目視検査が困難な隙間構造を減らすことができる。

3.5 複雑形状部の施工方法

複雑形状部についてはインダイレクトシーム溶接の適用が困難なため、従来のTIG溶接法により1.5mmのYUS270同士を接合する。高耐食性溶接材料であるインコネル625を用いることで溶接部の耐食性を確保している。溶接後は浸透探傷試験(PT)を実施して溶接部の健全性を確認している。

なお複雑形状部については設計上の工夫により、極力、メンテナンスが比較的容易な気中部やライニングが不要な海中部に配置するようにしている。そして気中部では超厚膜形エポキシ等の有機ライニングを適用して、構造物全体の防食コスト低減を図る場合もある。

4. 耐海水性ステンレス鋼ライニングの防食性

耐海水性ステンレス鋼ライニングが施された防食対象部は、ライニングが損傷しない限り、腐食因子から遮断されているので腐食することはない。ライニングが損傷する可能性としては、(1)YUS270の腐食による損傷、(2)衝突物による物理的損傷、(3)溶接部の疲労による破損の三つが大きな要因として挙げられる。そこで、YUS270の耐食性、耐海水性ステンレス鋼ライニングの耐衝撃性、耐海水性ステンレス鋼ライニングの疲労特性について検討した。

4.1 YUS270の機械的性質

表2に機械的性質の規格値と代表例を示す。YUS270はSUS304、SUS316の約1.5倍の耐力値を有する高強度ステンレス鋼である。また、高い硬さを有しているため、耐衝撃性、耐摩擦性も優れる。

4.2 YUS270の耐食性

YUS270は海水に対して優れた耐食性を有するように成分設計されたオーステナイト系耐海水性ステンレス鋼であり、高クロム鋼に十分なモリブデンを添加し、窒素と銅を加えることで飛躍的に耐食性を向上させている⁷⁾。代表成分は20Cr-18Ni-6Mo-0.2N-0.7Cuである。YUS270は海水淡水化プラントや海水熱交換器、海岸地域における屋根材として多くの実績を有している。

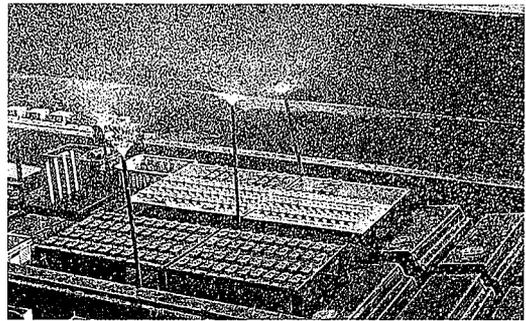
JIS G 0578に準拠してYUS270の耐孔食性、耐隙間腐食性を評価した結果を表3に示す。表3の隙間腐食発生限界温度は自然海水中で腐食しない上限温度にほぼ対応するとされており、YUS270が常温海水中で使用可能であることが分かる。

表2 YUS270の機械的性質

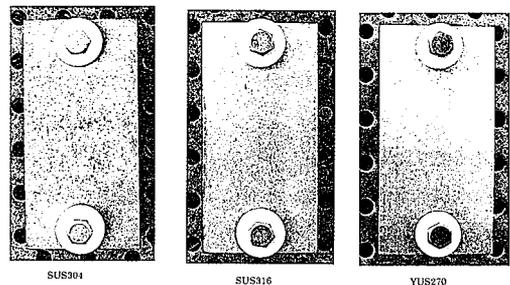
規格名	厚さ (mm)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	硬さ V
規格	-	≥300	≥650	≥35	≤230
例	1.2	461	843	39	192

表3 孔食発生限界温度及び隙間腐食発生限界温度

	耐海水性ステンレス鋼 YUS270	純チタン	SUS316L
孔食発生限界温度(°C)	70	>80	15
隙間腐食発生限界温度(°C)	50	>80	0



a) 港湾空港技術研究所での暴露試験状況



b) 暴露試験4年後の状況

写真2 ステンレス鋼の海水シャワー暴露による耐食性評価

また、独立行政法人港湾空港技術研究所にて海水シャワー暴露を実施しているが、4年6ヶ月経過した状況を写真2に示す。YUS270は金属光沢を保持しており、SUS304、SUS316と比較すると優れた耐食性を示している。

4.3 異種金属接触腐食への対応

YUS270は海水中で普通鋼よりも高い電位を示す。そのため海水中でYUS270と普通鋼が接触していると、図4a)のように電位差により普通鋼からYUS270へ海水を介して電流が流れ、普通鋼の腐食速度が増大する。この現象は異種金属接触腐食と呼ばれ、普通鋼とステンレス鋼を併用するときは注意が必要である。耐海水性ステンレス鋼ライニング境界部ではYUS270と普通鋼が接触しているが、大気部は超厚膜形エポキシ樹脂塗装により腐食環境から遮断されているため通常は異種金属接触腐食の懸念はない。また、海中部はアルミニウム陽極による電気防食が施されているため、図4b)のように最も電位が低いアルミニウム陽極から普通鋼及び耐海水性ステンレス鋼ライニングに電流が流れ込むことによって普通鋼の腐食が防止される。

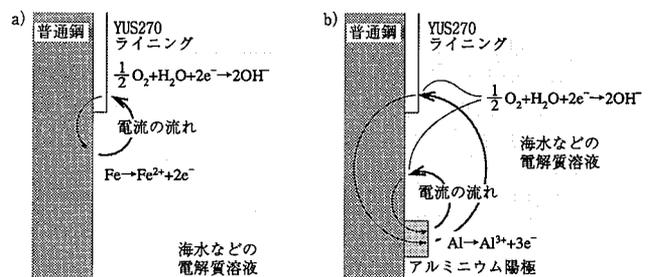


図4 異種金属接触腐食の電気防食による抑制

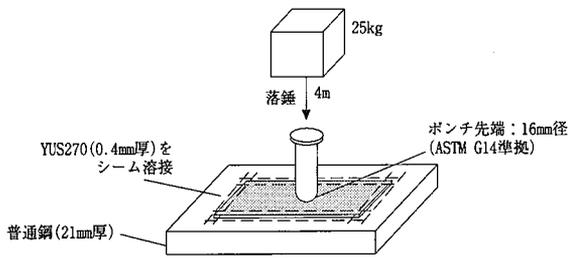


図5 YUS270ライニングの落錘衝撃試験



写真3 衝撃試験片の断面観察写真(YUS270:0.4mm厚)

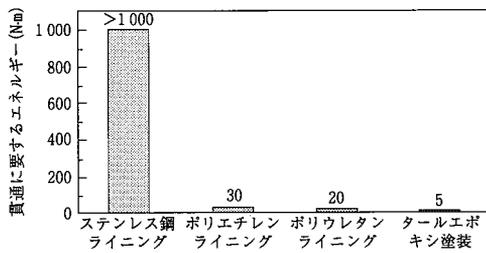


図6 各種防食被覆の耐衝撃性(ポンチ径:16mm)

4.4 耐衝撃性

海洋鋼構造物の飛沫・干満部では船舶や漂流物の衝突の可能性があり、衝撃によりライニングが損傷する可能性がある。そこで、耐海水性ステンレス鋼ライニングの耐衝撃性を評価した。

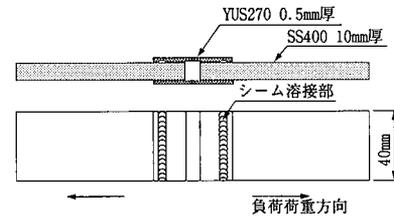
衝撃試験はラインパイプ用防食被覆の耐衝撃性評価方法として規格化されているASTM G14を参考にして実施した。図5に示すように0.4mmのステンレス鋼ライニングに1000N・mの衝撃エネルギー(質量25kgの錘を高さ4mから落下)を加えた時の試験片の断面写真を写真3に示す。母材部に变形を伴ったにも関わらず、平面部、溶接部ともに貫通傷は発生しなかった。

1kJ(1000N・m)のエネルギーは、総トン数20トンの小型船が0.2m/sで接触した時のエネルギーにほぼ相当する⁸⁾。本衝撃試験では先端径16mmの鋼製ポンチを用いたが、実際の衝突ではライニングと衝突物との接触はもっと広範囲になり、衝突エネルギーは分散される。そのため、衝突エネルギーが1kJよりも更に大きい場合でもライニングを貫通する損傷が発生する可能性は低いと考えている。比較として、一般的に使われている他の防食被覆での衝撃試験結果を図6に示す。耐海水性ステンレス鋼ライニングは格段に優れた耐衝撃性を有していることが分かる。

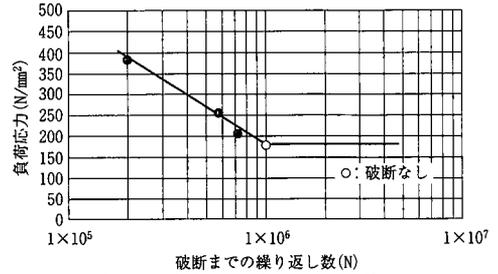
4.5 シーム溶接部の疲労特性

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(ライニング材板厚0.5mm)の疲労試験を実施した。

試験は、図7(a)に示す試験体を作製し、疲労試験条件を、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7(b)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⁹⁾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る。A等級継手の疲労特性は表面を機械仕上げした帯板(表面及び端面、機械仕上げ)と同等であり、シーム溶接部がきわめて良好な疲労特性



(a) 疲労試験に供した試験片



(b) 疲労試験により得られたS-N線図

図7 インダイレクトシーム溶接部の疲労試験

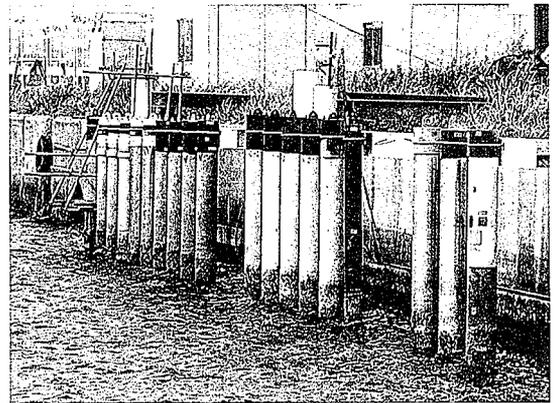


写真4 YUS270ライニング鋼管の暴露試験状況

を有していることを確認している。

4.6 実暴露実験

耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した鋼管を、北九州市若松区の新日本製鐵若松鉄構海洋センター内岸壁に暴露した。3年経過しているがライニング部分は溶接部、海洋生物が付着した隙間部分等を含め腐食は認められなかった。また、電気防食の併用により海中中部における異種金属接触腐食も防止できることを確認した(写真4参照)。

5. 耐海水性ステンレス鋼ライニングの維持管理

5.1 電気防食工法との併用について

YUS270は通常の中水中では腐食の懸念がないため、ライニング部の電気防食は不要である。ただし、電気防食対象である海中中部普通鋼と電氣的に導通しているため、アルミニウム合金陽極で発生した防食電流がYUS270にも流入する。実験により、水線下の耐海水性ステンレス鋼ライニングに流入する電流量は海中中部で普通鋼に流入する電流量とほぼ同等であることを確認している¹⁰⁾。そのため、電気防食設計時には表4に示すように、M.S.L.以下の耐海水性ステ

表4 ステンレス鋼ライニングを適用した鋼構造物の電気防食設計例

電気防食範囲	防食電流密度
普通鋼部	100mA/m ²
耐海水性ステンレス鋼ライニング部(海中中部~M.S.L.)	100mA/m ²

ンレス鋼ライニング部も防食対象とすることを推奨している。

5.2 損傷部の補修について

万一損傷が発見された場合は、飛沫部～干満部(上部)については損傷部に1.5mmのYUS270パッチを当てて現地にてTIG溶接による補修が可能である。また、海中部については損傷により普通鋼が露出した場合でも電気防食により普通鋼が防食されることを確認しているが、ドライチャンバーにより乾燥環境を作ればパッチ当て補修が可能である。更に現地補修技術として十分な実績のあるペトララムライニング工法やモルタルライニング+FRPカバーも適用可能である¹¹⁾。

5.3 ステンレス鋼ライニングの維持管理

設計供用年数が長期である構造物については、防食工法の維持管理を確実に行うことが重要である。例えば、干満部以上に耐海水性ステンレス鋼ライニング、海中部に流電陽極式電気防食を適用した海洋鋼構造物については、1回/年のライニングの目視点検及び電気防食状態確認のための対海水電位測定と1回/5年の詳細目視点検及びダイバーによる海中部のライニングと陽極の観察を実施することを推奨している。このような定期点検に加え、不慮の出来事が生じたときは臨時点検及び適切な措置を実施することで、大規模なメンテナンスを必要とすることなく、100年といった超長期の供用も可能であると考えている。なお維持管理システムについては今後の技術の向上に伴い、遠隔からの常時モニタリング等により更なる合理化、省力化が図られると思われる。

6. ステンレス鋼ライニングの実績

これまでに耐海水性ステンレス鋼ライニングを適用した代表的な構造物を表5に示す。

表5 耐海水性ステンレス鋼ライニングを適用した代表実績

施設名	場所	施設目的	設置時期
絵柄漁港物揚場棧橋	北海道室蘭市	棧橋	1997
南風泊漁港沖防波堤	長崎県高島町	杭式防波堤	1998、1999
大津島(馬島)漁港防波堤	山口県徳山市	杭式消波堤	1999、2000
境漁港棧橋	鳥取県境港市	物揚場棧橋	1999、2002
富津火力発電所 第2LNGバース	千葉県富津市	LNG受入バース	1999
佐賀関漁港防波堤	大分県佐賀関町	杭式消波堤	2001
大井埠頭新5バース	東京都	コンテナ棧橋	2002
大阪港夢洲トンネル立坑	大阪府大阪市	沈埋トンネル立坑	2002
北九州港二島埠頭	福岡県北九州市	棧橋	2002
北九州港川代埠頭	福岡県北九州市	棧橋	2002

7. おわりに

近年の新設構造物においては、ライフサイクルコスト評価に基づく設計が重要視されるようになってきている。従来の海洋鋼構造物における防食設計は、期待耐用年数が長期の場合は、“低い初期コスト+高い維持管理コスト”もしくは“高い初期コスト+低い維持管理コスト”という選択肢しかなかった。紹介した耐海水性ステンレス鋼ライニングは、“低い初期コスト+低い維持管理コスト”を実現しており、長期供用時のライフサイクルコスト最小化を図れる防食法である。

耐海水性ステンレス鋼ライニングは順調に実績を重ねつつあるが、更なる施工コストの低減及び信頼性の向上を目指して、接合方法の高効率化の検討や実暴露試験を継続して検討している。今後は、実構造物の経過調査結果のフィードバックも行いながら、経済性と信頼性を更に高いレベルで両立した防食システムを構築していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 金井久, 石田雅己: 産業分野別に見た防錆技術—海洋構造物—, 防錆管理, 43(5), 167-185 (1999)
- 2) 玉田明宏: 長寿命重防食技術の開発とその耐海水性支配因子の効果—最近の海洋超重防食技術の動向—, 材料と環境, 45(4), 244-255 (1996)
- 3) 山本章夫, 長谷泰治, 高橋康雄: チタンクラッド鋼板による海洋鋼構造物防食技術の開発, チタン, 47(3), 218-226 (1999)
- 4) Jones, B. L., Sansum, A. J.: Review of Protective Coating Systems for Pipe and Structures in Splash Zones in Hostile Environments, Corrosion Management, 1996, p.9-14
- 5) 吉田 健: 東京湾アクアライン海ホテル建設記念碑“カッターフェイス”と耐海水性ステンレス鋼について, 防錆管理, 42(9), 330-334 (1998)
- 6) 佐藤弘隆, 河合康博, 岩見博, 石田雅己, 金井久, 盛高裕生: 傾斜板式防波堤に適用した耐海水性ステンレス鋼ライニングの耐久性について, 海洋開発論文集, 16, 405-410 (2000)
- 7) 宇城 工: 耐海水性ステンレス鋼の最近の動向, 材料と環境, 41, 329-340 (1992)
- 8) 渡部彌作: 新版港湾工学, コロナ社, 1979
- 9) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針, 1993
- 10) 佐々木信博, 佐藤弘隆, 石田雅己, 阿部正美: ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性, 防錆管理, 46(3), 6-11 (2002)
- 11) 阿部正美: 海洋構造物の腐食と防食対策, (社)日本防錆技術協会, 2002