

## 解 説

UDC 620.193.27 : 620.197 : 669.14.018.19 : 551.46

## 海洋鋼構造物防食技術の現状と最近の動向\*

寛 建 彦\*\*

## Current Status and New Trends of Corrosion Preventive Technology for Marine Steel Structure

Takehiko KAKEHI

## 1. ま え が き

海洋環境に構築される構造物としては、従来、栈橋や護岸、鋼矢板岸壁といったものが主なものであつた。しかし近年、これらのほかに大型シーバース、湾岸道路、産業廃棄物処理場、石油、ガス掘削用海洋プラットフォーム、海洋レジャー施設、大型架橋などが建設されるようになり、さらに最近では、海上、海中貯油タンク、海上プラント、海上空港などの建設が海外はもとより、わが国においても計画あるいは検討され始めている。

このように、海洋構造物は多様化、大規模化の傾向をたどり、その置かれる場所も沿岸から沖合へと広範囲にわたるようになってきた。

これらの構造物は海洋というきびしい腐食環境におかれるため、腐食による鋼材の損耗は避けられない問題であり、何らかの防食対策を施すことが必要とされる。

従来、海洋鋼構造物の海水中、海土中部に対する防食対策としては電気防食が採用され、また、干満帯より上部に対しては主として塗装による防食が行われてきた。

これらの防食方法は、構造物の置かれる環境の多様化や海水汚染などの環境の質的な変化、ならびに低経済成長下における省資源的観点からの設備寿命延長の要求、あるいは安全性重視などの情勢の変化から、防食基準の部分的な訂正や新しい防食材料、防食工法の開発などが要求されるに至つた。

このような背景のもとに、腐食防食に関する多くの調査研究が各所で進められ、その中から時代の要求に沿つた新しい防食技術も開発されつつあり、既に実用に供されているものもある。

ここでは、海洋鋼構造物の防食技術に関して、現状および最近の動向を概観することとしたい。

## 2. 海洋環境における腐食防食の概要と最近の動向

## 2.1 海洋環境における鋼材の腐食

腐食防食の立場からみた海洋鋼構造物の接する環境は垂直、方向にそれぞれ特徴のある数種のゾーンに分けることができる。すなわち、海上中、海水中、干満帯、飛沫帯、海洋大気部である。

これらの各ゾーンにおける鋼材の腐食は一樣ではなく、その環境の腐食性によつて大小があり、また、防食方法もそれぞれの環境の条件に合つたいくつかの種類に分かれる。

海洋環境における鋼材の腐食については、これまで多くの調査があり報告されている。代表的な調査例を図1<sup>1)</sup>に示す。これは、米国ノースカロライナ州ライツビル海岸での5年間の調査結果で、鋼矢板と含銅鋼とを海中に打ち込んで腐食試験を行つたものである。海洋環境における鋼材の腐食パターンは、他の多くの調査結果でも図1と同様の傾向である。これらの調査結果からすると、海洋環境の各ゾーンにおける鋼材の腐食は、次のように特徴づけられる。

- (1) 一般鋼材では、海水中と飛沫帯の腐食が大きい
- (2) 腐食の最大値と最小値の差が大きく局部的な孔食を生ずる。
- (3) 海底付近と水線付近にマクロセルを生ずる。
- (4) 海土中と海洋大気部では、海水中、飛沫帯に比して腐食は小さい。

海洋環境で以上のような腐食傾向を示す鋼材に対して、防食方法はおよそ次のようである。

海水中、海土中 電気防食  
干満帯、飛沫帯 塗装および他の被覆防食

\* 昭和 53 年 4 月 28 日受付 (Received April 28, 1978) (依頼解説)

\*\* 中川防蝕工業(株) (Nakagawa Corrosion Protecting Co., Ltd., 2-2-2 Kaji-cho Chiyoda-ku Tokyo 101)

海洋大気部 塗装

2.2 海水中, 海土中の防食

海洋鋼構造物の海水中, 海土中部の防食には, 防食効果, 経済性, 施工性などの面から電気防食が最適であり, 現在もつばら, この方法による防食が行われている。

海水などの電解質液中に浸漬された鋼材の腐食は, 鋼材側および電解質側のもろもろの不均一性にもとづいて, その表面に腐食電池が形成されることによつて電気化学的に進行するものであるが, 電気防食は, このよう

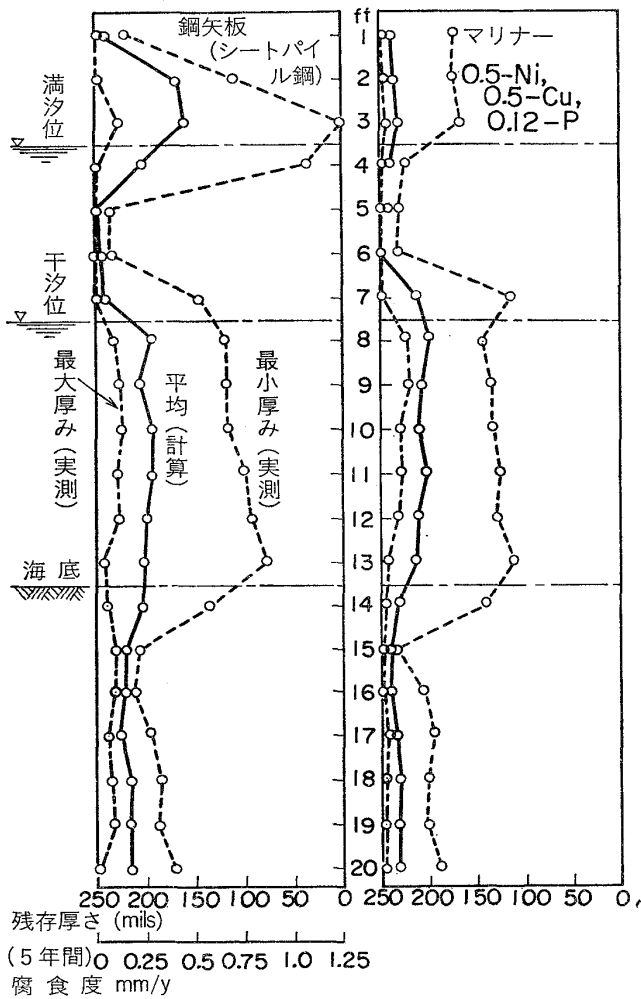


図 1 鋼矢板とマリナー鋼との腐食量の比較 (ノースカロライナ・ライツビル海岸にて 5 年間, Corrosion 14 (1958) 11)

な鋼材の表面に外部から直流電流を流入させ腐食電池を消滅させることによつて防食を達成するもので, その原理を模型的に示したのが図 2 である。

電気防食には, 直流電源装置により防食電流を供給する外部電源方式と, 鋼材より電位の卑な金属よりなる陽極を鋼材と接続し, 海水を電解質液として電池を形成させて防食電流を供給する流電陽極方式とがある。

2.3 干満帯, 飛沫帯の防食

海洋鋼構造物にとつて, 干満帯および飛沫帯は腐食が最も激しく, 孔食を伴つた凹凸の多い腐食形態を示す。

海洋鋼構造物の干満帯, 飛沫帯において, 海水中の電気防食による防食効果は, 干満帯の中間付近まで有効であるが, 満潮付近から上部は効果が及ばない。そのためこの部分の防食には, 他の防食方法を採用しなければならない。

従来, 干満帯飛沫帯の防食には主として塗装が採用されていた。鋼材は, 新設時陸上において十分な下地処理を行い, 良好な条件のもとで塗装して現場に搬入され組み立てられる場合が多いが, 腐食性の激しい環境だけに, 陸上施設などと比較して塗膜の寿命が短いため, さらに耐久性の良い塗料やライニング材の開発が進められている。

建設時に施された防食塗膜は, 一般に数 100 ミクロンの膜厚であるので耐用年数の長短はあれ, いずれは劣化損傷などにより発錆するに至るが, このように発錆した既設鋼構造物でその後補修が困難なため錆びるにまかせて放置されているものが国内でも相当多数あつて問題視され始めており, これら既設鋼構造物の干満帯, 飛沫帯に対して, 現場において施工可能な防食工法, 防食材料の開発が望まれている。

既に発錆した鋼材の干満帯, 飛沫帯は, 表面が錆や貝類などの生物, 油類などに覆われ, 波浪に洗われ海水の飛沫を受け, 紫外線や海塩粒子を含む大気にさらされるといった状態にあるので, この部分の長期防食対策にはきびしい条件が要求される。

この場合に要求される条件としては,

- (1) 高級な素地調整を行われないで施工でき, 十分な防食効果が得られること。
- (2) 水中および飛沫帯でも施工可能であること。
- (3) 防食材料の耐衝撃性が大きいこと。

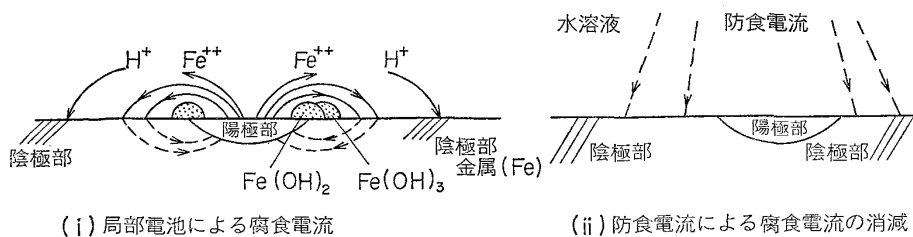


図 2 鉄の腐食と電気防食法の原理

(4) 防食材料は、耐候性、耐海水性などに優れ長寿命が期待できること。

などがあげられる。

このような条件を満足する防食方法として、最近、有機系材料による被覆、有機系—無機系複合材料による被覆などが開発され実用に供されている。

### 2.4 海洋大気部の防食

海洋大気部の鋼材の防食には、従来より主として塗装が採用されている。

最近の経済情勢のもとでは、鋼構造物の耐用寿命の延長がはかれる傾向にあり、防食塗装についても重防食塗装の適用を考慮されることが多く、このような目的に適した耐久性のある塗料や塗装系の開発が進められ実用に供されつつある。

塗装において、鋼材表面の塗膜の耐久性は、塗膜そのものの耐久性にもよるが、さらに、鋼材表面の塗装前処理の程度によつて大きく左右される。防食塗装においては一般にブラスト処理が行われるが、このブラスト処理は普通珪砂を用いてドライな状態で行われるため粉塵公害の問題があり、最近、いろいろな制約を受けるようになってきた。

このような状況の中から、ウォータージェットブラストやウェットブラスト処理が台頭し<sup>2)</sup>、また一方では、錆の上に塗れる塗料の開発<sup>3)</sup>も進められている。

水を使用するブラスト処理は、もどり錆を防止するためにインヒビターを添加して行わなければならないが、インヒビターの使用は、廃水汚染や地下水汚染につながるおそれがあるため、アミン系やニトロソ系に代る無公害型のインヒビターの開発研究が行われている。

錆面上に塗れる塗料には、まだ決定的なものはない。海洋鋼構造物の防食塗装は、設置される現場付近で塗装されるのが一般的であるが、そのほか、工場においてブラストを行い、プライマーおよび一次塗装をして現地に搬入し、構造物建設後仕上げ塗装および補修塗装を行うようなケースもある。この場合のプライマーの選択も、公害問題および上塗塗料との関連から重要な問題である。

海洋鋼構造物大気曝露の防食には、塗装のほかに、樹脂ライニングあるいは高級な表面処理を必要としないペトラタムテープ被覆などが最近行われている。

以上、海洋鋼構造物の腐食および防食について概略を述べたが、最近の防食技術とその動向について以下やや詳細に述べてみたい。

### 3. 海水中、海土中の防食技術

海洋鋼構造物の海水中、海土中の防食対策としては、これまで電気防食法が圧倒的に多く採用されている。これは電気防食法が海水中、海土中で防食効果が確実であり、また、長期防食が可能であるなどの理由によるものである。

電気防食法は、海洋鋼構造物のみならず各種の鋼構造物の水中部、土中部の防食法として古くから採用されており、多くの実績を有している。

電気防食以外の防食法としては、モルタルあるいは有機系被覆材による被覆防食が海底管などにまれに採用される程度である。

#### 3.1 電気防食

電気防食にはその給電方法によつて流電陽極方式と外部電源方式の2種類の方式がある。いずれの方式を採用するかは、構造物の規模、環境、電源の有無、保守管理、経済性などを十分検討して決定する必要がある。

両方式の特徴を表1に示す。

##### 3.1.1 防食電流密度

電気防食の設計を行う上で最も重要なことは防食電流密度を決定することである。国内では従来海洋鋼構造物に対する防食電流密度として海水中 100mA/m<sup>2</sup> の値が標準として採用されていた。しかし最近になつて沿岸海域の海水汚染が進行し、また海洋鋼構造物が沖合や海峡あるいは河口付近などさまざまな場所に設置されるようになって、従来の標準的な防食電流密度では適当でない場合も生じてきた。

防食電流密度に影響する主な因子としては、(1)海水汚染、(2)潮流、波浪、(3)水温(4)塩分濃度などがある。海水汚染は、湾内で海水の停滞する場所や河口付近でその影響が大きく、潮流、波浪の影響は、海峡や沖合に設置される構造物で問題となり、流速が大きくなるに従つて防食電流密度を大きくする必要がある。水温の影響は、温泉水の流出する海岸付近や工場の温廃水などによるものがある。水温が上昇すると一般に腐食は増大する。塩分濃度は清浄海水ではほぼ一定であるが、河口付近では濃度が減少する。海水の濃度が幾分減少すると腐食が増大する場合がある。特に河口付近では、河川の汚染水と海水との混水となつて、非常に腐食性を増す場合がある。

このような防食電流密度に影響する要因がある場合は事前に調査を行う必要がある。

腐食防食協会では、水質分析法とあわせ表2<sup>4)</sup>に示す防食電流密度の基準値を指針として報告した。

世界の各地区でも、環境により防食電流密度は大きく

表1 電気防食方式の比較

外方式の特長 電源	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 大規模な施設の防食には流電陽極方式より施設費が安い、毎月電力料金が必要。</li> <li>2. 電源装置の電圧を調節することによつて防食電流の調整が可能。</li> <li>3. 電極設置スペースが小さいので狭隘な場所にも設置できる。</li> </ol>
流方式の特長 陽極	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 電源の利用できない場所や移動する対象物にも適用できる。</li> <li>2. 施工が簡単で維持・管理費用はほとんど不要。</li> <li>3. 電力料金が不要。</li> </ol>

表 2 海中鋼構造物の防食電流密度 (初期値)

海 域	対 象	防食電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )
清 浄 海 域	海水中 (裸鋼材に対し)	100
	石積部 (裸鋼材に対し)	50
	海土中 (裸鋼材に対し)	20
汚 染 海 域		上記値の 20~50% 増*
高潮流海域 (2m/sec)	海水中	300

\* 汚染の程度によつてはこれより大きい値とすることがある。

表 3 世界の各海域における防食電流密度  
(mA/m<sup>2</sup>)

海 域	防食電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	
	海 水 中	海 底 土 中
メキシコ湾岸	54~90	20
米国太西洋岸	54~90	20
米国太平洋岸	75~100	20
アラスカ・クック湾	250~400	32~44
北 海	80~160	20
アラビア湾	75~150	20
スエズ湾	100~150	20
インドネシア	60~70	20
アフリカ西岸・ナイジェリア	85~120	20

異なる。主な海域で実施されている防食電流密度の値を表 3<sup>5)~7)</sup>に示す。アラスカのクック湾や北海の波浪のほげしいところでは、かなり大きな値の電流密度が必要であり、米国太西洋岸やインドネシア海域では、小さな電流密度でよいことが示されている。

海土中は、海水の影響をあまり受けないので、各国ともほとんどの海域で、従来からの 20 mA/m<sup>2</sup> の値がそのまま採用されている。ただし、各種の汚染因子を含むヘドロが海底に堆積する場合は、非常に大きな防食電流密度を必要とすることがあるので注意を要する。

海洋鋼構造物の電気防食には、外部電源方式と流電陽極方式があることは前記した通りであるが、大型の海洋鋼構造物、特に洋上施設などは、保守管理が重要な課題となり、また近年性能の安定した、発生電流量の大きいアルミニウム合金陽極が開発されたこともあつて、大型長寿命のアルミニウム合金陽極を使用して、ほとんどメンテナンスの不要な電気防食が行われるようになった。海外においても、北海、インド沖などの石油掘削用の大型プラットフォームには、1個 300 kg~350 kg の大型のアルミニウム合金陽極が使用されて長期防食が行われている。

現在市販されている陽極の主な性能を、表 4 に示す。

アルミ合金陽極以外の陽極もそれぞれ特徴があり、例えば、亜鉛陽極などは土中で安定した性能をもつと共

表 4 流電陽極の性能\*

	亜鉛合金	Mg 合金	Al 合金
陽極電位 (V. VS. S. C. E)	-1.05	-1.50	-1.10
有効電位差 (V <sup>**</sup> )	0.20	0.65	0.25
理論電気量 (A·h/kg)	820	2 210	2 870
有効電気量 (A·h/kg)	780	1 210	2 440 ~ 2 300
電流効率 (%)	95	55	85~80
消耗量 (kg/A·y)	11.8	7.2	3.6~3.8
比重	7.2	1.8	2.8~2.7

\* 合金組成、使用する環境条件により性能は多少変化する。

\*\* 完全防食状態の鉄鋼電位 (約 -0.8V) と通電中の陽極の電位との実用的な電位差

表 5 外部電源法用電極の性能

	常用電流密度 (A/dm <sup>2</sup> )	消 耗 量 (kg/A·y)
白金メッキチタン	5~7	6~10×10 <sup>-6</sup>
鉛-銀 2% 合金	0.5~3	0.03
磁性酸化鉄	0.1~1.0	約 0.1>
人造黒鉛	0.1	0.1~0.2
ケイ素鋳鉄	約 0.5	0.3~0.5
鉄 鋼	—	約 9

に、長寿命のものが可能なため、海底パイプラインの継手部を利用して取付ける方法により、長距離海底パイプラインの防食を可能にしている。

一方、外部電源方式には、防食電流を自動的に調整することによつて、常に適切な防食が可能であるなど優れた特徴をもつものが開発されている。例えば、移動式のドリリングリグなどでは、構造物の置かれる環境条件の変化に応じて、防食に必要な電流値を自動的に適切な値に制御して防食効果を維持することのできる外部電源方式の電気防食装置が実用されている。

外部電源方式に使用する不溶性電極には、消耗量が少なく発生電流の安定した電極材が開発されている。

現在使用されている外部電源方式用電極の性能を表 5 に示す。

近年、性能のすぐれた白金メッキ電極が容易に製造できるようになったことと、すぐれた絶縁材料および電気材料の開発により、外部電源方式による防食も多くなってきている。大西洋上の鋼製浮体式原子力発電所には、外部電源方式による電気防食装置が採用された報告<sup>8)</sup>がある。防食計画に際して十分事前調査が行われ、特に水線部は波浪の影響が大きいため防食電流密度を大きくとり、電流分布の均一化を考慮した電極配置を行うと共に、防食電流の自動制御が行える方式となつている。

海洋鋼構造物に対する電気防食技術は、今後さらに進展するものと思われるが、海洋開発が進むに従つて構造物の置かれる深度も深くなる傾向にあるので、今後は、深海における電気防食技術の開発も必要となるであろう。

表6 海洋構造物の塗装系 (上部構造)

塗装系号	素地調整の種類	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	第7層
A	製プラスチック	厚膜型無機質ジンク クリッチペイ 75 $\mu$	短期ばくろ型エマ チンダグ 48h以上	フェノール系ジン ククロメート 30 $\mu$	フェノール系 MIO 10 $\mu$	フェノール系 MIO 16h以上	塩化ゴム系中 塗 30 $\mu$ ~40 $\mu$	塩化ゴム系上 塗 25 $\mu$ ~30 $\mu$
B	同上	亜鉛溶射 75~125 $\mu$	同上	同上	同上	同上	同上	同上
C	同上	厚膜型無機質ジン クリッチペイ 75 $\mu$	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 48h以上	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 12h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	ポリウレタン 系上塗 30 $\mu$	同上
低温時	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
D	同上	亜鉛溶射 75~125 $\mu$	同上	同上	同上	同上	同上	同上
E	同上	厚膜型無機質ジン クリッチペイ 75 $\mu$	同上	同上	同上	同上	同上	同上
F	同上	厚膜型無機質ジン クリッチペイ 50 $\mu$	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 48h以上	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	同上	同上
低温時	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
G	厚板プラスチック	無機質ジンク クリッチペイ 20 $\mu$	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 48h以上	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	厚膜型エポキシ 樹脂をシアン ナで約50%希 釈した液を塗 装 24h	同上	同上
低温時	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
H	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
低温時	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
I	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上

表 7 昭和 49 年度海洋構造物の防食の現状調査報告の概要  
(主として使用された鋼材と防食法のまとめ)

分類	調査 件数	鋼 材	防 食 法			備 考
			海上大気部	飛 沫 帯	海中・海底土中	
海洋石油掘削装置 (リグ)	12	普通鋼または普通鋼+高張力鋼の併用	塗装*1 (ジクリッチプライマー+エポキシまたはタールエポキシ系)	重塗装 (同左) 1部電気防食の併用有り	電気防食または電防+塗装 (電防: Al 陽極) (塗装: 同左)	*1 補修の簡単な場所は目的に応じた塗装 (主甲板: デッキペイント) (居住区: 合成樹脂塩化ゴム・エポキシ等)
海洋土木作業台 (プラットフォーム)*2	9	同上	塗装 (ウォッシュプライマー+合成樹脂系)	重塗装 (ウォッシュプライマー+エポキシまたはタールエポキシ系)	塗装 (同左) (電気防食との併用は少ない)	*2 自己昇降式作業台 (SEP) は補修が可能なためリグや固定式作業台に比べて防食性に劣る塗装系が採用されている
シーバース	45	① 棧橋・ドルフィン方式は同上 ② 係留方式は普通鋼のみ	—	重塗装 (無機ジクリッチプライマー, タールエポキシまたは無機ジクリッチプライマー+タールエポキシ)	電気防食または電防+塗装*3 (電防*4: Al 陽極) (塗装: タールエポキシ)	*3 塗装以外に1部アスファルト等のライニングあり *4 古いものは外部電源方式が多い
*5 海中展望塔 海中レストラン アクアポリス	6	普通鋼または普通鋼+高張力鋼の併用	塗装 (エポキシまたは合成樹脂系等)	重塗装 (エポキシまたはタールエポキシ系)	電防+塗装 (電防: Al 陽極) (塗装: エポキシ系または塗装 (タールエポキシ))	*5 海中展望塔の調査4件中2件は各環境共 FRP ライニング
観測塔 燈 標 ブ イ 実験台	19	普通鋼 (1部耐候性鋼, 耐海水性鋼が併用)	塗装 (エポキシ, タールエポキシまたは合成樹脂)	重塗装*6 (同左)	塗装または電防+塗装 (電防: Al または Zn 陽極) (塗装: 合成樹脂またはタールエポキシ系)	*6 燈標の飛沫帯で1部樹脂, コンクリート, ステンレス等のライニングあり
海底 パイプライン	25	普通鋼	—	—	パイプ外面: 電防+塗覆装 電防: 外部電源方式が主体 (塗覆装: コンクリート+アスファルト系) パイプ内面: 防食なしが多い	—
*7 沈埋トンネル	4	普通鋼	—	—	電防+塗装*8 (電防: 外部電源) (塗装: タールエポキシ)	*7 すべてコンクリートの外面を鋼板で包んだ構造 *8 防食なし電防のみもあり

### 3.2 その他の方法による防食

海洋鋼構造物の海水中, 海土中の防食は, そのほとんどが電気防食によつてなされていることは前記した通りであるが, 海底管の外面は, モルタル被覆あるいは有機系被覆材によるライニングと電気防食とが併用されるこ

ともある。最近, 東京湾を横断して布設された海底管は, 外面にポリエチレンライニングを施しさらに外部電源方式で電気防食を行つている。また, 海水管の内面モルタル被覆を行つて防食することがあるが, モルタル厚み 10cm で 10 年間の防食が達せられた報告<sup>9)</sup>がある。

表 8 各種被覆材の水蒸気透過率

材 科 名	膜 厚 ( $\mu$ )	透 過 値 (Perm)*	透 過 率 (Perm-inch)**
ガラスフレークライニング (A)	1 700	0.0085	0.0006
ガラスフレークライニング (B)	875	0.0457	0.0016
ガラスフレークライニング (C)	450	0.1220	0.0022
エポキシ塗料	225	1.690	0.0153
FPR ライニング	2 150	0.0909	0.0079

\* Perm : grain/m<sup>2</sup>·h·mmHg

\*\* Perm-inch : Perm×膜厚 (inch)

一方、鋼管の内面コーティングは、管継目の保護が不十分となるので電気防食との併用例も増加している。

#### 4. 干満帯飛沫帯の防食技術

干満帯飛沫帯は、波浪やしぶき、あるいは海塩粒子などを含む湿潤空気に絶えずさらされる環境であるため防食施工上、既設構造物に対しては施工不可能な場合があり、また一方、新設既設を問わず施工可能なものもある。

ここでは、干満帯飛沫帯の防食技術として、新設構造物に施工可能なものと新設既設を問わず施工可能なものに分けて述べることとする。

##### 4.1 新設構造物に施工可能なもの

###### 4.1.1 塗装およびライニング

海洋鋼構造物の干満帯飛沫帯の防食塗装には普通重防食塗装が採用される。この場合の重防食塗装系としては、表6に示すように、ジンクリッチ系下塗り塗料と厚膜型の樹脂塗料との組合せのものが多く、表7に示す各種海洋鋼構造物における実施例が示すように、すでに大型鋼構造物の防食塗装として定着した感がある。

厚膜型有機系塗料には無溶剤型、高顔料型の塗料があり、一回塗りで 200 $\mu$  以上の膜厚を付着させることができる。材質的にはコールタールエポキシ、ポリエステル、ビニール系、塩化ゴム系およびウレタン系樹脂などが多く使用されている。

これらの重防食塗装系の耐用寿命は、膜厚ならびに環境にもよるが、海洋鋼構造物の場合には5年~10年程度と考えられる。これ以上の耐用寿命を得るためには、さらに膜厚の大きいライニングの使用を考慮しなければならない。

ライニング材で最近使用されているものとして樹脂モルタルがある。樹脂モルタルとは樹脂の中に粒状の無機質の骨材を入れたものであり、本来は圧縮強度の要求される床の塗布材として使用されてきたものである。海洋環境にある鋼材の防食用としては5mm~10mmの厚さとしているので、かなりの耐久性が期待できる。ただし、このものの水の透過性は、樹脂分と骨材の配合比により異なるので、防食用として用いるときは樹脂分の多い配合比とするのが望ましい。使用される樹脂は、エポ

表 9 陰極的電流印加テスト

材 科 名	膜厚 ( $\mu$ )	外 観
ガラスフレークライニング(A)	1 500	変化なし
ガラスフレークライニング(B)	800	
エポキシライニング (ガラスチョップ入)	3 000	傷部より全面浮き
タールエポキシ	300	フクレ著しく全面浮き

キシ系が一般的である。

一般に、ライニング皮膜の耐久性は、皮膜の物性値ならびにその経時変化により判定することが多い。塗布材として要求される物性は、主として鋼材との密着性および透水性、水蒸気透過率であり、特に後者は防食性能に重要な関係をもつので、塗料、ライニング材を含めた遮水型塗布材の選定の場合の有力なきめとなる。

皮膜の透水性および水蒸気透過率がきわめて小さく、すぐれたライニング材として海洋鋼構造物をはじめ各種鋼材の防食用に最近使用され始めたものに、フレークライニングがある。フレークライニングは、骨材としてガラスフレーク(鱗片状ガラス片)を約30%程度入れたものである。

このフレークライニングは10数年前から、米国で腐食のはげしい化学プラントやタンクなどの防食ライニング材として使用されており、日本においては数年前より、排煙脱硫装置などの防食に使用されてきた。その後、海洋関係の雑誌<sup>10)</sup>に海洋鋼構造物の干満帯、飛沫帯に対する20年寿命の被覆材として紹介されそれ以来大型鋼構造物の防食に適用しようという動きが高まっている。

フレークライニングは表8、表9のごとく、他の被覆材に比較して水蒸気透過率がきわめて小さく、また、陰極として通電した場合に、電流による塗膜劣化促進テストで他に類をみない優れた性能を示す。塗膜の劣化による腐食は一般に、塗膜下の錆の発展、腐食電池等の浸透圧によるフクレ、塗膜の老化による接着力の低下などの要因で進行するが、フレークライニングはこの種の性能が他の被覆材にくらべて優れているので、海洋鋼構造物および水門扉などに、より長寿命の被覆材として使用できる。フレークライニングに使用される樹脂は不飽和ポ

ポリエステル樹脂やエポキシ樹脂が主なものである。前者では、耐食性の点からビスフェノールやエポキシアクリレート系が使用される。

耐久性ライニングとしてはこのほか、ガラスクロスまたはガラスマットを強化材とした FRP ライニングが用いられている。FRP ライニングはガラス繊維の量を増して皮膜の厚みを増大させさらに強度を増すことができるので、防食皮膜として安定なものが得られるが、塗覆作業が手作業であり熟練を要するため施工の際の能率が低く、価格的には高価なものとなる。

海洋鋼構造物の干満帯、飛沫帯の防食には、このほか、シートライニングやゴムライニングも採用されることがあるが、この種のライニングに使用される接着材の長期耐久性がまだ十分に確認されていない。これらのライニング材は伸びや弾性を有するので、締めつけが容易でありまた外部からの衝撃に対して緩衝性を有するなどの特徴があるが、これらの特徴を生かした防食被覆材としての利用は今後の課題であろう。

#### 4.1.2 耐食性金属被覆

耐食性金属を被覆して行い防食としては、欧米においては一部に海洋鋼構造物の干満帯、飛沫帯の防食にモネル (Cu-Ni 合金) を被覆する方法が行われている。

モネルによる被覆防食は、厚さ 1~2mm のモネル板を、鋼管杭の干潮位付近より上部に巻きつけ溶接する方法で施工するが、モネルが機械的強度にとぼしく補修が困難なことや結構材のある部分に被覆し難いこと、また価格的に高価なことなどもあつて、わが国ではほとんど使用されない。

一方、最近、ステンレス鋼やチタンなどが海洋鋼構造物の干満帯、飛沫帯の防食材料の一つとして検討され始めており、近い将来に実用段階に入るものとみられる。東京港の灯標の杭には、既に、ステンレス板を巻いた例がある。

耐食性金属材料はそのほとんどが電気化学的な電位が鋼材よりも貴な金属であり、鋼材と組み合わせて使用する場合に、異種金属接触により鋼材の腐食を著しく促進することがあるので、使用に際しては十分な配慮が必要であり、特に、没水部は電気防食を行うなどして、このような弊害を防止する措置を講ずべきである。

#### 4.1.3 金属溶射

鋼材の干満帯、飛沫帯の防食として最近、鋼管杭に対する金属溶射の適用が検討されている。

防食用溶射材料としては、亜鉛、アルミニウムあるいは亜鉛-アルミニウム合金などがある。

海洋鋼構造物において、鋼管杭は単体で用いられることは少なく、現場において各種の結構材などが溶接されるのでこの部分の補修が問題となるが、それらを含めた施工技術も開発され、すでに実構造物に適用された例もある。

防食被覆としての金属溶射の利用は、後述の橋梁鋼材など海洋大気に曝される鋼構造物に対するものがほとんどで、干満帯、飛沫帯部に対する単独防食としての利用にはなお問題が残されている。

### 4.2 新設、既設構造物に施工可能なもの

#### 4.2.1 モルタル被覆

モルタル被覆は、栈橋鋼管杭の干満帯より上部の防食被覆として、あるいは海水管内面の防食ライニングとして比較的以前から一部で採用されていた。

モルタルが鋼材に対して防食性を保持するためには、モルタルの pH が 11 以上であり、海水中の塩分が浸透しないことが必要である。鋼管内面のモルタルライニングは、工場において管理された状態で加工されるので品質にバラツキが少なく良質のものが生産されるが、それに対して、栈橋などの鋼管杭の干満帯、飛沫帯の防食モルタル被覆は現場施工となるため、施工時の海水の混入や浸透、大気中の二酸化炭素によるモルタルの中性化や劣化、モルタル被覆中への酸素拡散の不均一などに起因する腐食電池の形成、モルタル硬化時に発生するき裂への海水浸透などのため、徐々に防食性能を失う結果になる。

このような、劣化因子が被覆中に拡散浸透するのをできるだけ少なくし、かつ、モルタル打設時の型枠の役目も兼ねさせるものとして、最近、鋼管杭モルタル被覆用の FRP 製型枠が開発され実用に供されている。この FRP 型枠は、モルタル打設後もそのまま取りつけておくので、海水や酸素などの腐食促進因子がモルタル中に浸透拡散するのをかなり防ぐことができ、防食性能は、モルタルのみの被覆の場合より相当に向上することになる。この場合に使用する FRP 型枠は、海水の浸入しにくい構造であることが望ましく、またモルタル被覆施工に当っては、海水と混合しないような細心の注意が必要である。

モルタル被覆用型枠としてはこのほかに、化学繊維布地製、軟質ターポリン製の袋状型枠やガラス繊維強化コンクリート製の型枠などが市販されている。

#### 4.2.2 ペテロラタムテープによる被覆防食

ペテロラタムテープは、地中、大気中の鋼材の防食用として古くより用いられていたが、最近、これを使用した海洋鋼構造物の干満帯、飛沫帯の被覆防食工法が開発され実用に供されている。

ペテロラタムテープ被覆は、施工が簡単で特に鋼材表面にグレードの高い前処理を必要としないことや海水中で施工した場合でもペテロラタムの撥水性によつてすぐれた防食性を保持する点に特徴がある。

表 10 に、海洋環境において行つたペテロラタムテープによる鋼材の防食試験結果を示す。

ペテロラタムテープにより鋼材の干満帯、飛沫帯を防食する場合に、テープをそのまま被覆しただけでは機械



表10 試験片によるペトロラタムテープの被覆防食効果 (試験期間 649 日)

環境	非防食片 (ss-41)	防食片 (ss-41)	防食率
	侵食度 (mm/y)	侵食度 (mm/y)	
飛沫帯	0.0799	0.0003	99.5
干満帯	0.2570	0.0004	99.8
海水中	0.1100	0.0007	99.4

合成ゴム保護シート使用

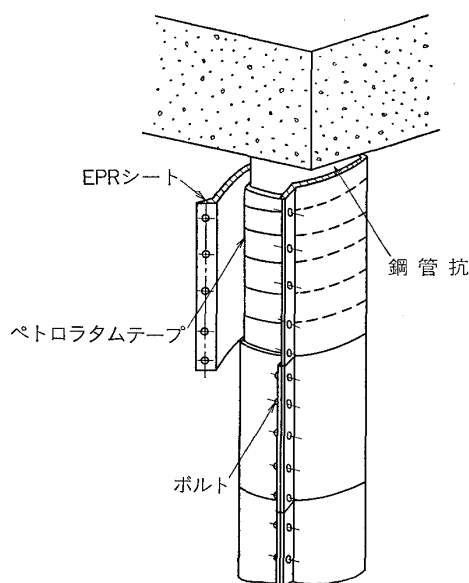


図3 ペトロラタムテープによる被覆防食施工要領

的強度に劣るため、波浪や漂流物により損傷を生ずるおそれがあり、テープ被覆の外側に保護被覆体を必要とする。この目的で用いられる保護被覆体として現在 EPR (エチレンピロピレンラバー) 製のシートあるいは FRP 製のカバーが使用されている。これらの保護被覆体は耐久性に優れているので、ペテロラタムテープの防食性と相まって、長期の防食が可能である。

図3に、ペトロラタムテープによる被覆防食施工要領を示す。

ペトロラタムテープによる被覆防食は、鋼管杭のみならず、各種の形鋼の干満帯、飛沫帯にも適用され始めている。

#### 4.2.3 樹脂ライニングによる防食

最近、既設海洋鋼構造物の干満帯上部および飛沫帯の防食に水中硬化樹脂ライニングが一部使用されている。

水中硬化型樹脂ライニング材は、エポキシ系の基材と硬化材との二液型となっており、ライニング施工時に良く混合するよう練り合わせて使用する。水にぬれた鋼材面にも良く接着するが、塗布後硬化するまである程度の硬化時間が必要なので、硬化するまでに波浪に洗われる

ような場所では使用できない。施工はウェットハンド法 (手塗り) あるいはこて塗り法によるため、能率が悪いのでこの面の改善が今後の課題といえる。

水中硬化型樹脂ライニングは、国内で採用され始めてからまだ間がないので、防食効果を評価するためには、今後さらに実績の積み重ねが必要であろう。

## 5. 海洋大気部の防食技術

### 5.1 塗装

海洋大気部は経年後のメンテナンスが行いやすい環境なので、防食塗装としては各種の塗装系を適用できるが、内陸部に比べてはるかに腐食性の大きい環境のため、やはり重防食塗装系が主体となる。

この環境での防食塗装としては、干満帯、飛沫帯に対する塗装やライニングがそのまま適用できる。すなわち塗装としては、ジンクリッチペイントとその上塗り塗料としてのエポキシ系、ポリエステル系、ビニール樹脂系、塩化ゴム系、フェノール樹脂系 MIO (雲母状酸化鉄顔料) 塗料などの組合せ、あるいは後者のみの組合せなど各種の塗装系が採用される。

腐食の激しい場所や重要な施設では、超耐久性の樹脂ライニングが採用される場合もある。ライニングには、フレックライニングや FRP ライニングなどがある。

### 5.2 金属溶射

金属溶射が防食被覆として最も多く使用されるのは、この海洋大気部における鋼構造物に対してである。

金属溶射は、防食被覆として古くから用いられていたが、1930年代から、欧米を中心に橋梁などの大形鋼構造物の防食に採用されるようになった。

わが国では、1958年に、皇居の二重橋の鉄骨全面に亜鉛溶射が採用されたが、金属溶射が本格的に大形鋼構造物、特に、橋梁鋼材の防食被覆として検討され始めたのは、1973年秋に完成した関門橋以来のことである。関門橋では、補剛けた全面に亜鉛溶射が採用されたが、その後本四架橋をはじめ、大形橋架の防食に亜鉛またはアルミニウム溶射に塗装を併用するいわゆる複合被覆系による重防食被覆が検討されている。関門橋の上塗り塗料としては、フェノール樹脂系 MIO 塗料に塩化ゴム系着色塗料が採用された。

金属溶射と塗装による複合被覆系は、英国において早くより採用されており、上塗りとして MIO 塗料を使用したものが多い。その代表的なものとして、Forth Road Bridge の例を上げれば、グリットブラストで素地調整を行い、その上に 75 μ の亜鉛溶射、エッチングプライマー塗装、フェノール系ジクロロメート塗装、フェノール樹脂系 MIO 塗料塗装 (2回) という複合被覆系である。

金属溶射上の塗装系としては、まだ確立されたものはないようであるが、MIO 入りの塗料が多く使われ、好

成績であるといわれている。

防食用溶射材料としては、亜鉛、アルミニウムのほか耐食性、密着性に優れた亜鉛-アルミニウム合金線が開発され市販されている。

従来、金属溶射は人力による手作業で行われており、きわめて非能率的なためコスト高の原因となっていたが、最近、高能率な溶射装置や自動溶射装置などの導入が一部で進められており、今後、金属溶射の高能率化を目ざしての装置の開発も進められるであろう。

### 5.3 ペトロラタムテープ被覆

ペトロラタムテープは、高級な素地調整を行わないでも優れた防食効果が得られる所に大きな特徴があるが、このような、防食性能に優れている点と施工の簡便さから最近、栈橋などの配管を始め海洋環境の鋼材、特に配管関係の防食に多用され始めている。

近時、公害上の問題などから、現場においてブラスト処理を行うことがきわめてむずかしくなり、塗装のメンテナンスも困難になつてきたが、このような場所で簡単に施工できるものとしてペトロラタムテープが脚光をあびてきた。

ペトロラタムテープ被覆には、手動工具により表面処理を行いその上にラッピングしてペトロラタムテープを被覆する工法が行われている。

ペトロラタムテープ被覆は、そのまま使用されることが多いが、その上にさらにポリエチレンテープなどを被覆する場合もある。

ペトロラタムテープは、常温用のもののほか最近、高温用のものや難燃性のものなども開発されており、今後、海洋大気部にある鋼材ばかりでなく、各種の鋼構造物の防食被覆として多用されるものと思われる。

## 6. あとがき

以上、海洋鋼構造物防食技術に関する現状と最近の動向について概要を述べた。

海洋鋼構造物の防食は、施設の大形化に伴ない、メンテナンスフリーを目的とした長期の防食対策が指向される傾向にあり、この面に沿つての技術開発の成果は着々と実用面に反映されている。

もちろん、これら防食の長寿命化のほか、防食装置の自動化、無公害化、管理システムなど質的な面での研究開発が進められ実用に供されていることは前述の通りであり、これらの技術開発は今後さらに発展して大きな成果をもたらすであろう。

海洋鋼構造物の防食も、これら技術開発の成果の上にそれらを複合集約して、構造物全体に対する総合防食システムとして確立される日も近いものと考えられる。

優れた防食技術が活用されて、省資源、省エネルギー、安全性の確立に寄与することを願つてやなまい。

### 文 献

- 1) Corrosion, 14 (1958) 11, p. 503
- 2) 井上 修: 塗装技術, (1976) 6, p.
- 3) 錆面上の塗料の開発研究, JSSC, 13(1977), p. 139
- 4) 腐食防食協会: 春季講演大会要旨集, (1977)
- 5) NACE: NACE Standard RP-01-76, (1976)
- 6) M. B. MACKAY: Offshore Technology Conference, No. 2156 (1975)
- 7) B. S. WYATT: Anti-Corrosion, 24(1977) 4
- 8) J. A. LEHMAN: Offshore Technology Conference, No. 2701 (1976)
- 9) 布村卓也: 配管技術, (1976) 3, p. 68
- 10) Ocean Industry 3, (1976)