

# 海中部・干満部および飛沫部における鋼構造物の防食技術



所属：(社)日本鉄鋼連盟  
海洋防食第一分科会  
発表者：釣 之郎

## 1 はじめに

海洋環境は一般に海中部、干満部、飛沫部および海上大気部にその腐食環境が区分できる。この内、干満部から特に飛沫部にかけては、鋼の腐食速度を支配する酸素還元反応に必要な酸素が十分供給されるだけでなく、鋼材表面に付着した海水の蒸発により塩化物イオン濃度が凝縮するため、極めて厳しい腐食環境になる。しかも、この領域は電気防食による鋼材の腐食の抑制が原理的に困難である。

近年では、例えば羽田空港再拡張事業において100年の耐久性が問われるなど、今後の社会資本整備ではLCMの視点が益々重視されるとみられ、海洋環境における鋼材の高度な防食技術の開発とその長期耐久性実証の重要性が高まりつつある。

本研究ではこのような社会的要請に基づき、1984年度から20年間に亘って、静岡県志太郡大井川町高新田地先の沖合い250mに位置する海洋技術総合研究施設を用いて(図1、図2)、①海洋環境における無防食材の腐食挙動、②高耐食性金属被覆法の適用による長寿命・低コスト防食技術の確立、③新規塗覆装材料および工法の実使用環境での確性、について検討したので報告する。

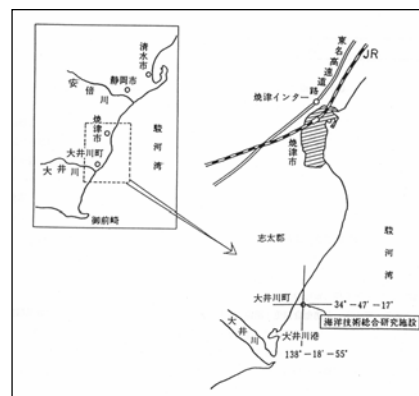


図1 海洋総合研究施設の位置

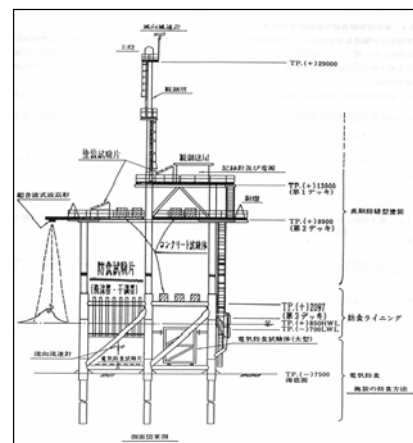


図2 海洋総合研究施設の概要

## 2 海洋環境における無防食材の腐食挙動

ブラスト処理によって予め黒皮を除去した140mm×140mm×3800mm×18mm<sup>t</sup>のL型鋼を5本それぞれ2.5、5.5、9.5、14.5および19.5年暴露し、海洋環境における鋼材の腐食挙動を調査した。

図3は引き上げた無防食材(普通鋼材)の板厚減少を示す。19.5年間の板厚減少量は飛沫部において最大7.3mm程度であり、飛沫部が無防食材にとって厳しい腐食環境であることが分かった。

図4は無防食材の腐食速度の経時変化を示す。図中の飛沫上部は TP+1.5~2.1m、飛沫株は TP+0.9~1.5m、干満上部は TP+0.1~0.9m、干満下部は TP-0.7~+0.1m の領域を指す(HWL は TP+0.85m、LWL は TP-0.7m)。本暴露試験では、試験体は所定の期間で引き上げて腐食量を測定しているため、ここに示す腐食速度とは試験期間の異なる複数の試験体の腐食量をそれぞれの暴露期間で割ったものであり、瞬間的な腐食速度ではなく、それぞれの試験体について時間的に平均した計算値である。すなわち、図4における長期(14.5、19.5年)の腐食速度の値には、暴露初期の腐食速度をも含むことに注意を要する。いずれの暴露部位においても、無防食材の腐食速度が初期から減少し続けており、14.5年を越えるとはほぼ一定値になることが判明した。

国土交通省港湾局発刊の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、鋼材の腐食速度の標準値として、飛沫部で0.3mm/年、干満部で0.1~0.3mm/年、海中部で0.1~0.2mm/年を記載している。これに比べ、本暴露試験の結果では、いずれの部位においても初期の鋼材の腐食速度が同基準を大幅に超過するものの、暴露試験の継続とともに急激に低下しており、上記基準の腐食速度の標準値が、数十年の供用期間の港湾施設を対象として供用期間中の平均値という観点から設定されていることを考慮すると、本試験の結果は同基準の範囲内にあると考えられる。

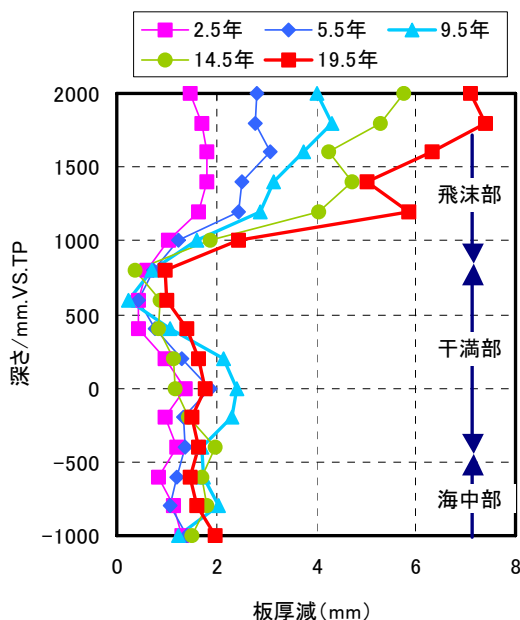


図3 深さ方向の減肉量分布(普通鋼)

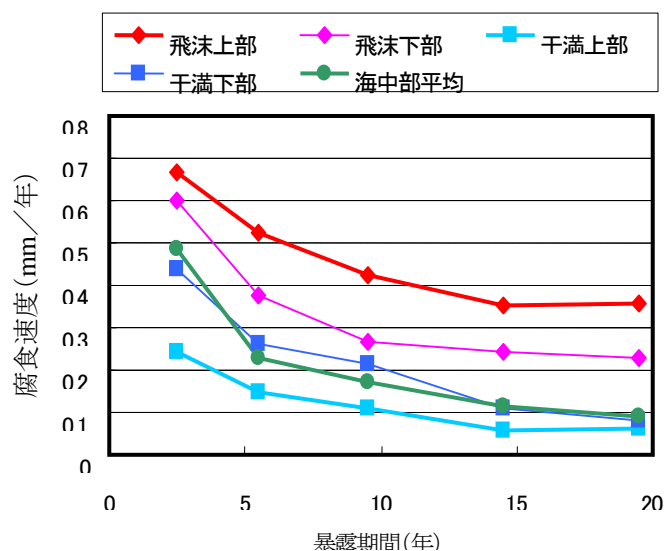


図4 環境毎の腐食速度の経時変化

### 3 高耐食性金属被覆法の適用による長寿命・低コスト防食技術の確立

一般にステンレス鋼は普通鋼等比べて耐食性が良好と見なされており、鋼材表面に到達する腐食因子を遮断する被覆材料の候補として挙げられる。しかしながら、塩分を大量に含有する海洋環境はステンレス鋼にとっても苛酷な環境であり、SUS304およびSUS316L鋼のような汎用ステンレス鋼では、孔食やすき間腐食等が発生することが知られている。特に大型海生生物の付着下でのすき間腐食の発生は大きな問題となっている。そこで、本研究では、汎用ステンレス鋼への電気防食の適用や、Cr、Mo等の耐食性改善元素を増量した高耐食性ステンレス鋼の適用によりステンレス鋼自体の耐食性を確保し、鋼材の防食材料としての適用性を検討した。

図5は、2年間暴露試験を行ったSUS316L鋼の腐食発生状況と電気防食の効果を示す。干満帯お

よび海中部では、電気防食をしない場合には最大1mmを越える深い局部腐食が多数発生するのに対し、-500mV(vs.SCE)の電気防食を施した場合には局部腐食の発生は全く認められなかった。SUS304鋼についても同様の結果が得られた。なお、これは2年間の結果ではあるが、電気防食が有効な限りは原理的に長期的にわたって効果を発揮するものと考えられる。

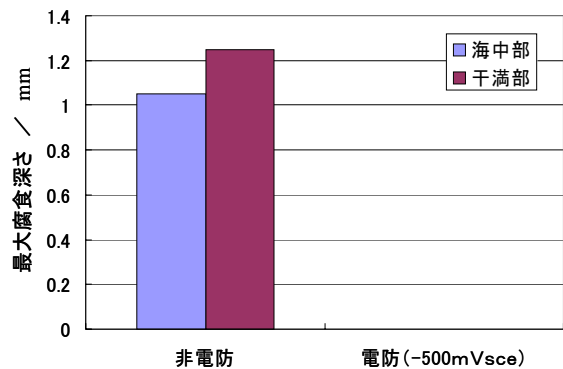


図5 2年間海洋環境に暴露した SUS316L 鋼の腐食状況と電気防食の効果

図6は、各種ステンレス鋼を9.5および

19.5年間暴露試験を行った際に、ステンレス鋼の自由表面の最大すき間腐食深さにおよぼす耐食性改善元素量の影響を示す。ステンレス鋼の耐食性改善元素量(Cr+3Mo+10N量)が38mass%以上の場合には局部腐食の発生は認められず、良好な耐海水性を有することが判明した(図6、7)。なお耐食性改善元素量が38mass%未満の場合には、海中部から干満部にかけて大型海生生物付着下ですき間腐食が発生し、飛沫部では孔食が発生した。

以上の結果を踏まえて、海洋環境において長期耐食性を有する新規な防食鋼材として、少なくとも干満部から飛沫部にかけて耐食性改善元素量(Cr+3Mo+10N量)38mass%以上のステンレス鋼で被覆し、さらに電気防食を併用したことを特徴とする、新たな防食技術が提案できるものと思われる。

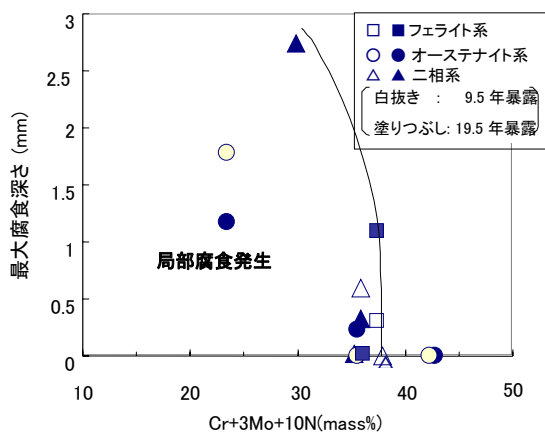


図6 海洋環境におけるステンレス鋼の耐食性に及ぼす耐食性改善元素量の影響



図7 19.5年間海洋に暴露した耐食性改善元素量38mass%のステンレス鋼の外観

## 4 新規塗覆材料および工法の実使用環境での確性

### 4.1 有機被覆鋼材

鋼材にポリエチレンやポリウレタンを被覆した有機被覆鋼材は、海洋環境における鋼管杭、鋼矢板および鋼管矢板等の防食材料として使用されている。本研究では、有機被覆鋼材の実使用環境における長期耐久性を実証するため、暴露試験を行った。

有機被覆鋼材の耐久性は、暴露試験による防食層の割れ発生の有無(耐衝撃性)、さびやふくれの発生の有無および防食層の交流抵抗の低下等で評価できる。今回、10～13年間海洋暴露試験

に供した有機被覆鋼材は、一部の試験材に飛沫部を中心にして傷が、海中部から干満部にかけては貝の食い込みが観察されたが、いずれも鋼面に達せず、当て傷や食い込みを起点とした防食層の割れ、さびやふくれ等の発生は認められなかった(図8)。また、暴露試験に起因する防食層へのピンホールの発生も認められなかった。一方、防食層の交流抵抗値は暴露期間中おおむね  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  オーダーの値を示し、長期の暴露試験にわたって防食層が初期のイオン透過抵抗を維持していることが確認できた(図9)。以上の結果より、本試験に供した試験材の防食層はほとんど劣化を起こしておらず、その結果、有機被覆鋼材は海洋環境において十分な防食性能を長期間有するものと考えられる。

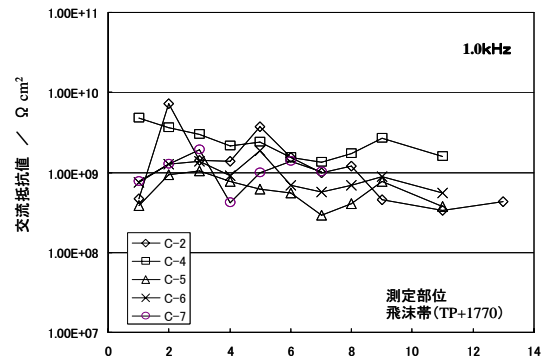


図9 海洋暴露した各種有機被覆鋼材の交流抵抗値

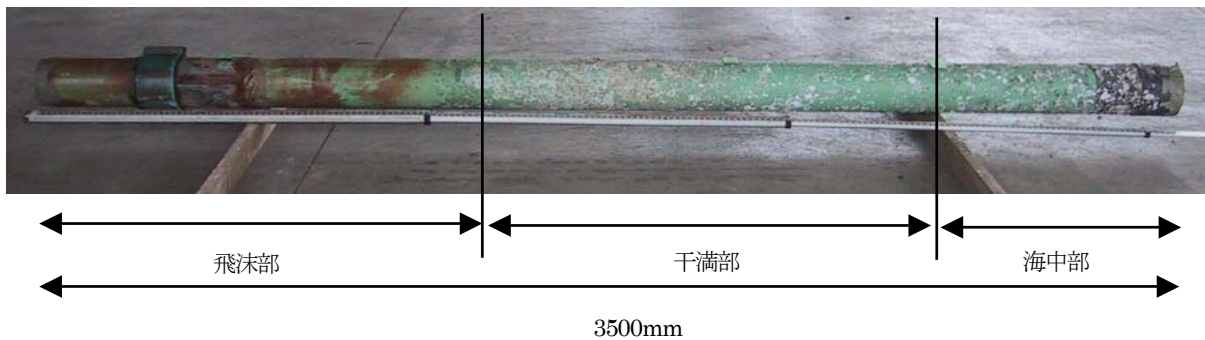


図8 海洋暴露したポリエチレン被覆鋼材の外観(除貝後)

#### 4.2 FRP保護カバーを用いたペトラタム被覆による鋼材の防食

保護カバー材を用いた被覆防食工法であるペトラタム系防食材+保護カバーの防食仕様は、新設と既設の鋼構造物の現地防食工法として、また塗装や被覆系などの防食の現地補修工法として有効である。そこで、この工法の実使用環境における長期耐久性を実証するため、暴露試験を行った。

保護カバー材を用いた被覆防食工法は、防食材とその防食材を保護するFRP保護カバー材との組み合わせによる防食システムである

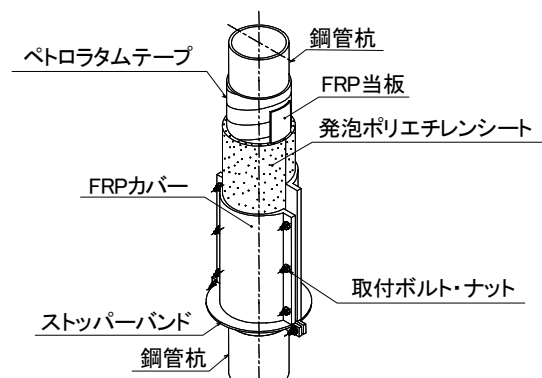


図10 ペトラタム被覆の概略図

(図10)。防食材は、防食対象物である鋼材面に所定の厚さで被覆することで、鋼材面を腐食環境から遮断する。さらに、防食材の表面に取り付けるFRP保護カバー材は、防食層が外力(波力・漂流物等)による損傷を受けないよう長期間にわたって保護するとともに、防食材を防食対象物の表面に圧着して防食効果を維持する機能を有する。これらのことから、長期間にわたって防食効果を維持する



には、防食材を保護するFRP保護カバー材の強度特性が重要な要素となる。

本暴露試験では当初、標準的な仕様のFRP保護カバー材を適用していたが、波浪や漂流物の衝突等で損傷を受ける結果となったため、衝撃性能が高いFRP保護カバー材へ変更したところ(表1) 損傷を低減させることができた(図11)。また、防食効果に関しては、暴露後19.5年時点でも鋼素地面に発錆等の腐食は認められなかった。以上より、海洋環境にある鋼構造物の長期防食に対してペトドラタム系防食材+FRP保護カバー系は防食効果の優れた仕様であることが確認された。

表 1 FRP 保護カバー材の耐衝撃性能比較例

	カバー設計厚さ (mm)	耐衝撃エネルギー (Kgf・m) 注)	耐衝撃強度比 (-)	暴露期間
標準仕様	2.0	0.81	1.0	1984年～1997年
耐衝撃仕様	4.5	5.65	7.0	1993年～

注) ISO/DIS6603 に準拠した試験法による



図 11 海洋暴露試験後のペトドラタム系防食材+FRP 保護カバーの外観  
左は標準仕様の、右は耐衝撃仕様の FRP カバーを用いた場合

## 5 まとめ

20年の長期暴露試験の結果、将来の技術開発の方向性や、提案仕様の有効性を証明する説得力の高いデータを系統だって採取し、当初の計画を完了した。

## 6 謝辞

海洋技術総合研究施設の維持管理を担当されている国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係者に謝意を表します。

## 7 参考文献

土木研究所、日本鉄鋼連盟：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書－暴露期間 20 年経過後までの研究成果－、共同報告書整理番号 347 号、平成 18 年 7 月