

海洋鋼構造物の被覆防食 工法に関する長期試験

福手 勤¹・阿部正美²・真鍋昌司³・栗栖孝雄⁴

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 (財)沿岸開発技術研究センター(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

⁴理博 鋼管杭協会(〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10)

鋼材は、海洋・港湾構造物を建設するための重要な建設材料であるが、その利用にあたっては信頼性の高い防食法を適用することが不可欠である。各種防食法の防食効果や耐久性を評価するには、実際の海洋環境下で長期間追跡調査することが、現在では最も信頼性の高い方法と考えられている。

著者等は栈橋構造物の鋼管杭に各種被覆防食を適用し、それらの防食効果の経年変化を調べ、技術改良を行っている。10年間にわたる追跡調査の結果、各防食法とも概ね満足すべき結果を示したが、保護カバーを用いる工法ではカバー等は波力に耐える強度が必要であること、塗装にはジンクリッチの下塗りが必要であること、電気化学的モニター法には改良の余地があることなどが明らかとなった。

Key Words : marine steel structure, organic high-build coating, inorganic high-build coating, petrolatum and protective cover system, painting, exposure test, visual inspection, monitoring

1. まえがき

鋼材はコンクリートと並んで、陸上の一般構造物のみならず、海洋・港湾構造物の建設材料として、現在の社会基盤施設の整備に必要不可欠なものとなっている。海洋・港湾構造物には、主に鋼管杭、鋼矢板、鋼管矢板が適用され、橋桁やセルなどにも鋼板が用いられている。

言うまでもなく、鋼材を建設材料として適用するためには、腐食対策が不可欠である。とくに、海洋環境に位置する鋼材は腐食因子のひとつである塩分の影響を直接受けるため、従来より防食材料、防食工法に関する技術開発が積極的に行われてきた。現在では海水中には電気防食、また干満帯、飛沫帯、海上大気中には被覆防食工法が用いられることが一般的である^{1)・2)}。これらの防食効果や耐久性を検証するためには、実際の海洋環境において同じ条件の下で施工し、長期間追跡調査することが、現在では最も信頼性の高い評価法と考えられる。

これまで著者等は、実際の栈橋構造物の鋼管杭



写真-1 試験に用いた観測栈橋

を対象に各種防食工法を施工し、防食効果や耐久性を長期間にわたり追跡調査を行ってきた³⁾。本報告は、これらのうち、

- (1) 各種被覆防食工法の防食効果の調査
- (2) 各種被覆防食材料の経年変化の調査
- (3) 現場での供用性を見ながらの技術改良・技術開発に関する施工後10年間の調査結果を取りまとめたものである。

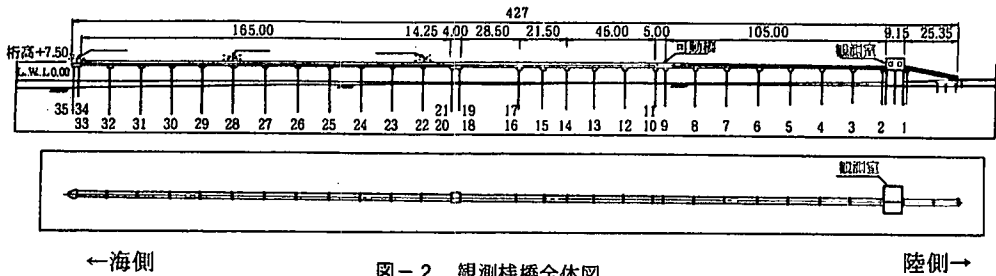


図-2 観測棧橋全体図

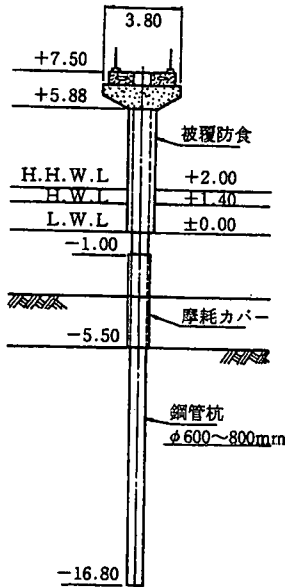


図-1 棧橋標準断面図

2. 長期試験の概要

(1) 試験に用いた棧橋

試験は、写真-1に示すように茨城県波崎町にある「運輸省波崎海洋研究施設砕波帯観測用棧橋」(以下「観測棧橋」と呼ぶ)の47本の鋼管杭(JIS A 5525, 直径60~80cm)を用いて行っている。観測棧橋は図-1の断面を持ち、図-2に示すように長さ427mで、太平洋に面した海浜に沖合に向かって直角に突き出す形で設置されている。なお、図-2には杭No. 1~35を示すが、杭No. 1~35の他に観測室下部に塗装工法を適用した杭No. K1~K12がある。

現場海域の月別平均有義波高は1~2mであるが、台風シーズンには約7mの有義波高が10年間に3回観測されたことがある。また0~50cm/sec程度の潮流が観測され、棧橋先端部の水深は-4~-7mの間で

変動し、本海域は海底の砂が大きく移動する「漂砂海岸」である。

本観測棧橋は防波堤で囲まれていないので、わが国の一般的な港湾と異なり、過酷な波浪や潮流が棧橋に直接作用する。そのため、防食工法の試験条件は極めて過酷といえる。

なお防食工の施工は、1984~1985年に観測棧橋の建設に合わせて行った。

(2) 防食工法の種類

観測棧橋の試験に用いた防食工法を大別すると、

①有機ライニング、②無機ライニング、③ペトロラタムライニング、④塗装、⑤電気防食の5種類であるが、本報告では、このうち①~④の被覆防食工法を検討の対象とした。また、本海域の腐食傾向を知るために無防食の鋼管杭も試験に供した。以下にそれぞれの概要を示す。

a) 有機ライニング(表-1) ⁴⁾

有機ライニング工法は、塗料系、塗料・シート併用系、マスチック系、ポリエチレン系に分類される。

塗料系は主に厚膜型エポキシ樹脂塗料または水中硬化型エポキシ樹脂塗料、ポリウレタン、ポリエステル樹脂塗料等である。塗料・シート併用系は鋼管杭にポリエステルテープや特殊磁性シートを貼ったもの、マスチック系は型枠と杭の隙間にエポキシ系樹脂を充填したものである。またポリエチレン系はすべて工場でライニングされたプレ防食被覆である。

合計膜厚は種類によって異なり、塗料系では3.6~6mm、塗料・シート併用系では1.1~1.2mm、マスチック系は10mm前後となっている。またポリエチレン系では工場での機械施工により2~3mmの厚さである。

鋼材表面の素地調整は、マスチック系はISO St3、その他はISO Sa2のグレードとした。

b) 無機ライニング(表-2)

無機ライニング工法には、セメントコンクリート(またはセメントモルタル)で被覆する方法と、電着工法がある。

前者には、スタッドジベルと鉄筋を配した杭とG

表-1 有機ライニング工法の仕様と外観

杭No.	工 法	被覆構成 (外側から内側へ)	膜厚(mm)	10年間の外観の所見	
塗 料 系	6	水中硬化型 ライニング工法	超厚膜型エポキシパテ 水中硬化型エポキシ樹脂 合計 5.6	5 0.6 5.6	若干の点錆あり。
	7	水中硬化型 ライニング工法	超厚膜型エポキシパテ ステンレス金網 水中硬化型エポキシ樹脂	全体で 3.3~5.3	刷毛塗り：若干の点錆あり。 パテタイプ：異常なし。
	9	水中硬化型 ライニング工法	タールポリウレタン系塗料 不飽和ポリエステル系パテ	0.6 3 合計 3.6	異常なし。
	10	水中硬化型 ライニング工法	不飽和ポリエステル系パテ	3.7	異常なし。
	15	水中硬化型 ライニング工法	水中硬化型エポキシ樹脂	5	栈橋上部工との接合部 からのもらい錆あり。
塗 料 シ ート 併 用 系	1	防食シート接着 ライニング工法	ふっ素系塗料 特殊磁性防食シート エポキシ系水中防食材 合計 1.1	1 0.1 1.1	下部のシートに剥離が 認められた。
	2	防食シート接着 ライニング工法	特殊磁性防食シート 銅箔シート エポキシ系水中防食材 合計 1.15	1 0.05 0.1 1.15	初期にシートの剥離が 認められた。
	5	水中硬化型 ライニング工法	水中硬化型エポキシ樹脂塗料 ポリエステルテープ 合計 5	5	退色、一部にブラケッ ト取付部跡からの割れ が認められた。
27	極厚マスタック 工法	水中硬化型エポキシ樹脂 プライマー 合計 10.1	10 0.1 10.1	異常なし。	
31	ポリエチレン被覆	ポリエチレン防食層	2.5以上	異常なし。	

注)1. 表-1と表-3の杭No. 6, 表-1と表-2の杭No. 10が重複しているが, これは杭No. 6は深さ方向+4.62~+5.88mを水中硬化型ライニング工法(表-1)を+0.62~+4.62mまでを一体成形防食工法(表-3)を適用している。杭No. 10は-3.5~+1.40mまでを電着工法(表-2), +1.40~+5.88mまでを水中硬化型ライニング工法(表-1)を適用している。

表-2 無機ライニングの仕様と外観

杭No.	工 法	被覆構成 (外側から内側へ)	膜厚(mm)	10年間の外観の所見
17	GRCカバー工法	ガラスファイバー+セメントモルタル 補強コンクリート 合計 122	12 110 122	カバーバンドの脱落に より, GRCカバーの 剥離, 発錆が認められた。
20	セメントモルタル+FRP カバー工法	FRPカバー セメントモルタル 合計 28	3 25 28	固定バンドの損傷。
29	鉄筋コンクリート 巻き工法	鉄筋コンクリート	150	異常なし。
10	電着工法	電着物(CaCO ₃ , Mg(OH) ₂ など)	5~15	異常なし。

RC (ガラス繊維強化セメントモルタル) やFRP (ガラス繊維強化不飽和ポリエステル硬化性樹脂) 製の型枠との間にセメントモルタルやポリマーセメントモルタルを充填し硬化後も型枠をそのまま残す方法と, 型枠を組み立て後にコンクリートを打ち込みコンクリートが硬化してから型枠を撤去する工法

とがある。防食層の厚さは30~150mm程度であり, ある程度厚い防食層は鋼管杭の補強効果も期待できる。

電着工法は海水中に設置した陽極から杭(陰極)へある期間, 直流電流を流し海水中のCa²⁺やMg²⁺をCaCO₃やMg(OH)₂から成る電着物層として鋼材表面に

表-3 ベトロラタムライニング工法の仕様と外観

杭No.	工 法	被覆構成 (外側から内側へ)	膜厚(mm)	10年間の外観の所見
6	一体成型防食工法	チタンシートカバー 発泡ポリウレタンシート ベトロラタムペースト	0.5 4~7 2.5kg/m ²	異常はなく良好.
12	ベトロラタム防食 法	FRPカバー 防食シート ベトロラタムペースト	2 2 500g/m ²	異常はなく良好. 過去に 保護バンドが脱落した.
13 14	ベトロラタム防食 法	ポリエチレンカバー 防食シート ベトロラタムペースト	5 2 500g/m ²	異常はなく良好. 過去に FRVカバーが破損した ため, ポリエチレン製カ バーに取り替えを行い, その後は良好.
21	粘着テープ+ FRPカバー	FRPカバー 膨潤ゴム 粘着テープ	3 3 2	異常はなく良好.
22	ベトロラタム工法 (A法)	FRPカバー クッション材 防食テープ ベトロラタムペースト	2 10 2 400g/m ²	異常はなく良好.
24	ベトロラタム工法 (B法)	FRPカバー 発泡プラスチック ベトロラタムペースト	4以上 5 2.5kg/m ²	過去に高波浪による破損 があったが, カバーを取 り替えた後は異常なし.

注) 1. FRV: ガラス繊維強化硬質塩化ビニール熱可塑性樹脂

析出させ、防食効果を期待する工法である⁵⁾。今回は1~4A/m²の電流を約4ヶ月間通電し、CaCO₃が30~40%、Mg(OH)₂が約30%から成る厚さ5~15mmの電着物層を得た。

これらの素地調整のグレードはISO St2とした。

c) ベトロラタムライニング (表-3)

ベトロラタムは原油から減圧蒸留により分離された石油ワックスの一種であり、JIS K 2235, JIS K 2246 に品質が規定されている。防食層は、ベトロラタムを主成分として腐食抑制剤などを添加しグリース状にしたペーストを不織布に含浸したテープやシートで構成されている。ベトロラタムはそれ自身に優れた防食性能を有するが、柔らかくそれ自体では形状を保つことができないため、保護カバーとともに用いられる。

今回の施工の保護カバー材には、FRPなどの強化プラスチックやポリエチレン系、チタンの薄板などを用いた⁶⁾。

防食層の厚さは、工法によって異なるが、概ね7mm以下である。また素地調整のグレードはISO St2とした。

d) 塗装 (表-4)

今回採用した塗装工法の厚さは約300μm~2mmまでである。いずれも入念な素地調整をした後、超厚膜型エポキシ樹脂塗装系はエポキシ樹脂層を1層で施工し、それ以外の塗装系では下塗り、中塗り、上塗

りの複数層に分けて施工した。これらの塗装系はジंकリッチペイントを下塗り塗料として用いているものと用いていないものに大別される。

なお、今回塗装工法を採用した杭は観測室下部の12本の杭で、いずれも通常は汀線よりも陸側にあるため、常時潮風や海水飛沫を浴びるものの、直接海水に浸漬する時間は他の工法を用いた杭に比べ少ない。

塗装工法の素地調整は、ISO Sa2 1/2とした。

e) 無防食杭

経時的に無防食杭No. 3およびNo. 16の鋼材の肉厚測定を行い腐食速度を求めた。

(3) 防食鋼管杭の設置状況

鋼管杭は漂砂による磨耗を防止するために、図-1に示すように-1m以深の部分に直径90cmまたは100cmの鋼製の磨耗カバーを取り付けた。工法によって被覆位置は異なるが、磨耗カバーよりも上部を被覆防食の対象とした。

(4) 調査方法

a) 外観観察

すべての杭に対し、毎年1度夏の時期に、目視により外観観察を行った。観察項目は防食工法によりいくらか異なるが、防食層のふくれ、亀裂、剥離、錆の発生状況、錆汁、ボルト、ナットおよび保護力

表-4 塗装の仕様と外観

杭No.	工 法	被覆構成 (外側から内側へ)	膜厚(μm)	10年間の外観の所見
K1	ガラスフレーク入り ポリエステル樹脂塗料	ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料	500 500 合計1000	ブラケット取付部跡から発錆あり。
K2	超厚膜型エポキシ 樹脂塗料	超厚膜型エポキシ樹脂塗料 エポキシリッチプライマー	2000	一部に点錆あり。
K3	超厚膜型エポキシ 樹脂塗料	超厚膜型エポキシ樹脂塗料 エポキシリッチプライマー	2000	一部に点錆あり。
K4	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗料	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 有機ジンクリッチプライマー	300 300 300 15 合計 915	一部に点錆あり。
K5	厚膜型無機ジンク /エポキシ/ポリウ タン樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料 ポリウレタン樹脂塗料 エポキシ樹脂塗料 厚膜型無機ジンクリッチペイント	50 50 125 75 合計 300	一部に点錆あり。
K6 K7	タールエポキシ樹 脂塗料	タールエポキシ樹脂塗料 タールエポキシ樹脂塗料 タールエポキシ樹脂塗料 ジンクリッチプライマー	150 150 150 20 合計 470	広い範囲に塗膜剥離あり。 チョーキングの発生と進行 が認められた。
K8	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗料	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 有機ジンクリッチプライマー	300 300 300 15 合計 915	一部に点錆あり。 チョーキングの発生と進 行が認められた。
K9	水系厚膜防食塗料 /ふっ素樹脂塗料	ふっ素樹脂塗料 ふっ素樹脂塗料 水系厚膜防食塗料 水系厚膜防食塗料	20 20 250 250 合計 540	全体に発錆あり。
K10	ガラスフレーク入り ポリエステル樹 脂/ふっ素樹脂塗 料	ふっ素樹脂塗料 ふっ素樹脂塗料 ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 ジンクリッチペイント	20 20 350 350 75 合計 815	一部に発錆あり。
K11	湿潤面用エポキシ 樹脂塗料	エポキシ樹脂塗料 (上) エポキシ樹脂塗料 (中) エポキシ樹脂塗料 (下)	300 300 300 合計 900	一部に発錆あり。
K12	ガラスフレーク入り エポキシ樹脂塗 料	ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料 ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料	500 500 合計1000	発錆とひび割れあり。

バーのゆるみ、チョーキングなどである。

b) 剥離調査

防食被覆層の解体、再取付けが可能なものについ
ては、防食層を20×20cm程度の範囲で剥ぎ取り、杭

表面の腐食の状態を観察した。

c) 附着強度

有機ライニングおよび塗装について、ピール強度
試験 (JIS G 3469) およびプルオフ試験 (DIN 307

1) により、鋼管杭との付着強度を測定した。

d) 絶縁抵抗

有機ライニングおよび塗装の防食層の劣化評価を目的として、導電性ゴムまたはアルミニウム箔を電極(50×50mm)とする方法によりライニング面に電極を貼り付け防食層の絶縁抵抗を、年に1回測定した。

e) アノード分極試験

無機ライニングによって被覆された鋼材表面の防食状態を把握するために、コンクリート中の深さ方向+3.5mと+5.0mの位置に材質SPB製のテストピース(φ2.5cm, 円形板)を設置しアノード分極試験を行った。

この方法は、塩分を含んでいないコンクリート中の鋼材表面には不動態皮膜が形成されているために分極試験を行うとアノード分極量は小さくなる。しかし、塩分を含んだコンクリート中の鋼材表面は塩素イオンにより不動態皮膜が破壊されるのでアノード分極量は大きくなる。それ故、アノード分極量を測定し、分極量の大小からコンクリート中の塩分浸透状況を把握し、防食状況を推測するものである。

試験はまずテストピースの自然電位(E_r)を鉛照合電極を用いて測定した。その後、テストピースから杭へ $1\mu A/cm^2$ の電流を2分間流した後に通電を停止し、インスタントオフ電位(E_i)を測定した。次に、 $5\mu A/cm^2$ の電流を2分間流した後に通電を停止し、インスタントオフ電位(E_i)を測定した。アノード分極量は、それぞれの電流密度に対し、 $\Delta E_i = E_i - E_r$ 、 $\Delta E_i = E_i - E_r$ により算出した。

f) インピーダンス

ペトロラタムライニングおよび塗装の防食層の状況を把握するために、インピーダンスを測定した。前者では防食層の中にテストピースとセンサーを取り付け、後者ではセンサーを塗膜外面に取り付けた。センサーは+3.5mと+5.0mの2箇所を設置し、200, 500, 1000Hzの各周波数におけるインピーダンス(抵抗、容量、 $\tan \delta$)を測定した。一般に防食層や塗膜が劣化してくると、抵抗は低下し、容量、 $\tan \delta$ は上昇する傾向があると言われており、これらの経時変化を測定することで防食層や塗膜の劣化状況が把握できる。

g) 無防食杭の腐食量

無防食杭No. 3およびNo. 16の鋼材の残存肉厚を測定した。測定箇所は杭の海側と陸側(断面方向)の水深方向の数箇所の定点で、超音波厚み計を用いて測定した。一地点で5箇所を測定し平均値を求め各定点の残存肉厚とし、次式により腐食速度を計算した。

$$\text{腐食速度 (mm/y)} = \frac{\text{初期肉厚 (mm)} - \text{残存肉厚 (mm)}}{\text{経過年数 (年)}}$$

3. 試験結果と考察

防食工法の試験結果は以下の通りである。

(1) 有機ライニング

a) 外観

外観調査結果の概要を表-1に示す。

塗料系は、主としてブラケット取付部跡など、膜厚が不足しやすいところで部分的な点錆、ワレなど小さな異常が認められた。塗料・シート併用系は部分的に端部剥離が認められるものがあった。ポリエチレン系およびマスチック系では異状はなく、良好な防食性能を有していた。

チョーキングはJIS K 5400の白亜化試験に準拠して測定したが、エポキシ系塗料が主体であるにもかかわらずチョーキングが認められないという結果となった。この理由は、チョーキングが発生しても、現地の強い海水飛沫により被覆表面が一種の洗浄を受け、チョーキングによる粉末状の表面物質が除去されたためと考えられる。このように、JIS法によるチョーキングの調査法は、本海域のような環境では適用できないと考えられるため、新たな調査法を検討する必要がある。ただしチョーキングによる塗膜厚さの減少は年間5~20 μm 程度であり、全体の膜厚からすればわずかなので、今回のような膜厚の厚い有機ライニングの防食性能への影響は小さいといえる。

b) モニタリング(電気抵抗測定)

各工法によって値は異なるが傾向としては以下のようなになった。

インピーダンスでは、 $\tan \delta$ は塗料・シート併用系では1.2~3.6、水中硬化型エポキシ系では0.1~2.3程度となっている。前者では若干の点錆が認められたのに対し、後者では腐食は見あたらぬ。ポリエチレン被覆を除く有機ライニングの $\tan \delta$ が5以下では塗膜下腐食は認められないという報告⁷⁾から考えると、今回の測定も $\tan \delta$ が小さい場合は腐食の可能性は小さい傾向にあるといえる。

絶縁抵抗では、測定値は水中硬化型エポキシ系、塗料・シート併用系、マスチック系、ポリエチレン系とも $10^8 \sim 10^{11} \Omega \cdot cm^2$ の範囲であった。なおポリエチレン系の現地測定ではバラツキが大きく、実験室での測定値($10^9 \sim 10^8 \Omega \cdot cm^2$)に比べ小さい値となることが多かった。これは絶縁抵抗測定時の漏洩電

流によるものとする。現地の測定では測定器や被覆表面、配線等に環境からの飛来塩分や水分が付着することにより、本来の測定電流以外の漏洩電流が発生し、その漏洩電流の影響で絶縁抵抗測定値が本来の被覆絶縁抵抗よりも小さくなることも十分考えられる。ポリエチレン系は絶縁抵抗値自体が他の有機ライニング系よりも大きいので、漏洩電流の影響を受けやすいと予想される。測定に際しては、これらの環境による影響を受けないようにする対策が必要であると考えられる。

c) 塗膜下腐食

一部に点錆のあるものが見られたが、ほとんどの杭で塗膜下に錆は認められず、10年経過した現在も良好な防食効果を示している。

d) 付着強度

プルオフ試験を行った杭全部に20kgf/cm² (2.0N/mm²)以上の付着力が得られた。初期のデータがないものが多いので経時変化は明確でないが、施工後10年の経過を考慮すれば、この結果は良好な付着力を保持しているといえる。

e) 適用範囲

有機ライニングは耐久性、耐衝撃性、耐摩耗性に優れた被覆材料であり、海洋構造物の海上大気中、飛沫、干満帯、海水中の全ての箇所でも適用可能である。

f) 施工性

ポリエチレン系以外は全て現地施工が可能な被覆工法である。

g) 補修・更新

補修は、大気中ではどの工法についても可能であり、比較的容易である。海水中での補修についても可能であるが大気中に比べ作業性に難がありコストアップにつながる。途中で補修したものは現時点ではどの工法も良好な状態である。

h) 経済性 (補修メンテナンス)

初期の施工に比べると小面積であるためにコストアップになる。

i) 総合評価

モニタリング測定、塗膜下の鋼材表面観察、付着強度測定結果から考えると、著しく劣化しているものは見られず良好な状態を保持していると評価される。

(2) 無機ライニング

a) 外観

外観調査結果の概要を表-2に示す。

概ね良好な状態を保っていたが、GRCカバー工法では保護カバーの損傷事例が10年間で3件あった。

表-5 GRCカバー工法のアノード分極試験結果

単位:mV

測定 時期	測定箇所			
	+5.0m		+3.5m	
	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_1	ΔE_2
H2.7	396	701	33	246
H3.6	505	785	59	99
H4.8	136	155	34	64

カバー固定用バンドの腐食・脱落、カバー天端部の充填材の脱落、GRCカバー本体の破損等が、試験開始7年目から発生し、部分的に素地が露出したところもあった。固定バンドが鋼製であったため腐食したこと、GRCカバーの厚さが12mmと薄く強度が不足したこと等が原因であり、いずれも解決可能なものであった。

FRPカバー工法、鉄筋コンクリート巻立て工法では損傷は認められず、防食性能は良好であった。

電着工法は、目視による観察の結果、電着物の剥離、脱落、錆汁の滲出は認められず、良好な防食状態にあった。

b) 剥離調査

FRPカバー工法および電着工法では防食層を剥離し鋼表面の観察を行ったが、発錆はなく黒色化していることより、今後も長年にわたって良好な防食状態が維持されていくものと思われる。

c) モニタリング

GRCカバー工法でアノード分極試験を行った。表-5は2深度(+3.5, +5.0m)で測定した結果を示す。

測定結果から、+3.5mの部位では+5.0mの部位よりも分極量が小さく、海水に接する時間が長いいため塩分の浸透量が大きいので腐食性が高い傾向が見られる。また経時変化を見ると、いずれの部位でも時間とともに分極量が小さくなっていることから塩分の浸透量が増加していることがわかる。これらのデータから判断すると、GRCカバー工法の防食効果の経年変化が危惧される結果となったが、1992年に実施した腐食調査では、いずれの部位においても腐食は認められず、十分な防食機能を有していることが確認されている。一般的には分極量が小さいと腐食が大きく、一方分極量が大きければ腐食は小さいといわれている。しかし、今回の調査では分極量と実際の腐食の進行を定量的に結びつけることは困難であったといえる。

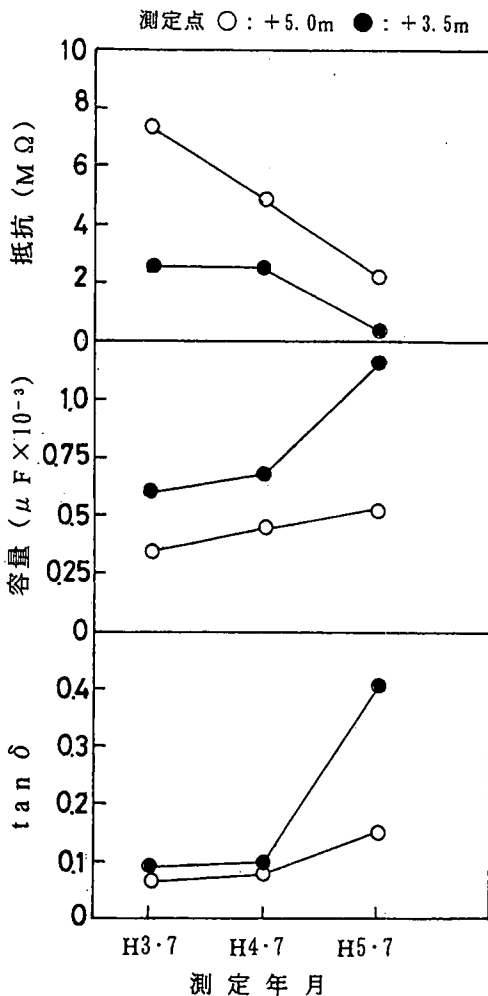


図-3 インピーダンス測定結果
(1000Hz)

d) 適用範囲

電着工法以外の工法は海水中、大気中を問わず適用することが可能であるが、電着工法は海水の電気分解により作られる電着物で防食層を形成する工法であるため、適用範囲は干満帯、海水中となる。

e) 施工性

新設、既設にかかわらず施工することができる。素地調整は各工法ともISO S12(3種ケレン)程度と作業性は良いが、補強を兼ねたGRCカバー工法や鉄筋コンクリート巻立て工法はスタッドジベルの打設や配筋等が必要である。セメントモルタルFRPカバー工法は素地調整後カバーを取付け、セメントモルタルを注入するだけであり施工は容易であった。

電着工法は仮設電極の配置や通電電流の調整等、適確な作業が要求される。

f) 補修・更新

いずれも部分的な補修・更新は可能である。

g) 総合評価

10年間の外観調査および10年目の開放点検結果より、いずれの工法も十分な機能を維持していることが確認された。ただし、保護カバーについては材質、構造、固定方法等に十分な配慮が必要である。

(3) ペโตรラタムライニング

a) 外観

外観調査結果の概要を表-3に示す。

強化プラスチック保護カバーは時間の経過とともに退色は避けられない。退色を防止するためには、ふっ素樹脂塗料やアクリル樹脂、アクリルシリコン系の塗料を上塗りとして使用する必要がある。

目視観察によるとFRPカバーにわずかに、チョーキングの傾向が認められたが、JIS K 5400に基づく試験では、ほとんど評価に値するような点数は認められなかった。これは(1)に示した有機ライニングで得られた現象と同じである。

チタンシートを使用したものはチタン特有の光沢が10年後も保たれていて、チタンの海洋環境下での優れた耐食性が確認できた。

一般に、ペโตรラタムライニングに限らず、保護カバー表面の錆は、外からの「もらい錆」と防食層内部から滲出した錆に大別される。10年目の調査では、すべてが上部コンクリートの下端やその他の鋼材からの「もらい錆」で、若干汚れているものの、内部から滲出した錆は認められず、防食効果は良好であった。

b) 剥離調査

防食層を剥離して鋼表面の観察を行ったが発錆は認められず、タンニン酸鉄と思われる黒色を呈していた。また防食層は粘性を保っており劣化は認められなかった。一方、膨潤ゴムと粘着テープの防食層も同様な方法で観察したが発錆は認められず、安定した防食が維持されていた。

c) モニタリング

代表的な杭(No. 13)におけるインピーダンス測定の結果を図-3に示す。経年的に抵抗値は減少し、容量とtan δは増加していることから、防食層に何らかの変化が現れていると思われるが、これは過去にFRVカバーが損傷した際に、海水が浸入したことも原因として考えられる。しかし、剥離調査の結果では腐食の兆候は認められなかった。

現在、実施しているインピーダンス測定によるモニタリングは、特に実構造物に対しては、必ずしも確立された手法ではないので、今後更に追跡調査を

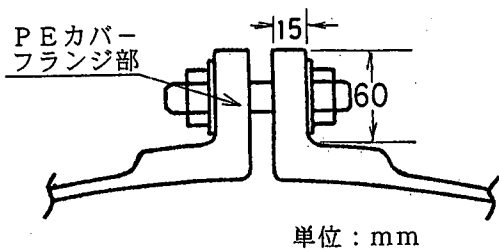


図-4 PEカバーフランジ部の寸法

行うとともに、モニタリング法の改良にも力を注ぐ必要があるといえる。

d) 保護カバーの耐久性

保護カバーの損傷事例は10年間で4件あったが、いずれも試験開始後1~3年目に発生している。これは①流木等の衝突と、②波の繰り返しによる疲労が原因と考えられる。

前者に対しては、漂流物による破損の危険性に対処するとともに、試験海域が強大な衝撃波力が作用する砕波帯に位置することを考慮し、当初1.5mm厚さのFRVカバーから厚さ5mmのポリエチレン（PE）製カバーに取り替えたところ、その後の破損は認められなかった。また後者に対しては、フランジ部分が厚さ4~5mm、幅80mmであったのを図-4に示すように厚さ15mm、幅60mmとすることにより、疲労しにくくした。その結果、その後の損傷は発生していない。

FRPの物性はガラス繊維の含有率によって異なるが、厚さ3mmのFRPカバーに対する衝突実験結果⁸⁾によると、衝突エネルギー36.0 Jまでは損傷を生じないが、41.2 Jで衝突部に白化現象が認められ、66.9 Jでは衝突部が破断している。この実験結果から求めたFRPカバーの非破壊衝突エネルギーの上限は、重量1トンの漂流物が毎秒約1mの速度で衝突した場合に相当すると記述されている。

ポリエチレン系でも同様の実験結果が報告されている⁹⁾。この試験結果によると、図-5に示す通り、被覆層厚の増大に伴い衝撃抵抗係数が二次曲線的に増加する傾向が認められていることから、保護カバーの増厚により耐衝撃性を大きく改善できることがわかる。

またカバー本体の破損以外の損傷事例には、保護カバーの固定バンドの脱落や、フランジ接合部のパッキンの一部欠損などがあった。これらの損傷も初期の段階で発生したが、固定バンドの材質をFRPから重防食塗装を施した鋼製に交換したことにより、

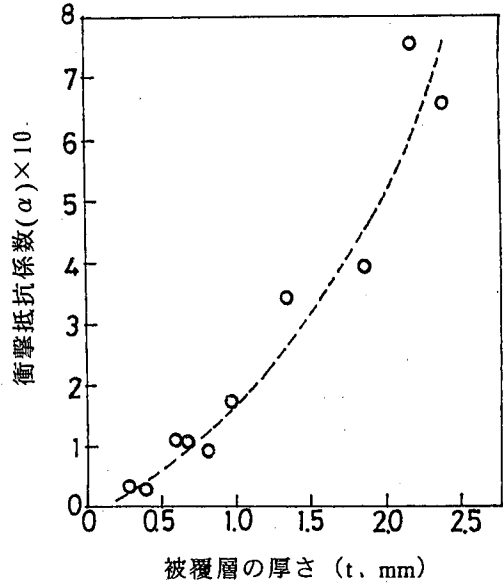


図-5 α と t の関係

その後の損傷は発生していない。

e) 適用範囲

ペトロラタムライニングは防食層を保護カバーで覆うため耐久性、耐衝撃性および耐摩耗性に優れた工法であり、適用範囲は海上大気中、飛沫・干満帯および海水中の全てに適用が可能で、新設、既設にかかわらず水中施工も容易に行うことができる。

f) 施工性

ペトロラタム系防食テープの作業性は高温（60℃）、低温環境（-5~0℃）でも適用でき、粘ちょう性が失われるようなことはない¹⁰⁾。低温環境で施工する場合、防食テープを加温（温水等に浸す）してから施工すると、作業性を向上させることができる。

素地調整は比較的簡単なISO S12~S13程度で十分なことから作業性はよい。

g) 補修・更新

補修・更新は各工法とも大気中、海水中を問わず容易に施工することができる。

h) 総合評価

10年目に実施した開放点検の結果、表面には錆の発生は認められず、安定した防食機能を維持していることが確認されており、今後も現状の防食状態が長年にわたって維持されるものと思われる。

(4) 塗装

a) 外観

外観調査結果の概要を表-4に示す。

超厚膜エポキシ樹脂塗料，ガラスフレーク入り塗料，エポキシ樹脂塗料などの塗装系ではもらい錆による部分的な汚損や一部上塗に若干の退色や汚れ等が認められるが，防食性能上の大きな異常は認められていない。

ただし，これらのものでも摩耗カバーとの接合部で発生した部分的クラック，局所的なピンホールやブラケット取付部跡などの膜厚不足の部位に錆・点錆が一部に認められるものもあった。

また，水系厚膜防食塗料では全体に発錆が認められた。

b) 剥離調査¹¹⁾

超厚膜エポキシ樹脂塗料，エポキシ樹脂塗料等の塗装系では一部に点錆が認められるが大きな錆は認められていない。

また，一部のガラスフレーク入り塗料系のものでは1, 2ヶ所に点錆が認められるものがあった。水系厚膜防食塗料では全体に錆の発生があった。錆，点錆の発生が認められたものは，いずれも下塗り塗料としてジンクリッチペイントを使用していない塗装系であった。

ジンクリッチペイントが下塗り塗料として適用されていない塗装系は，本試験の実施場所のような厳しい腐食環境では必ずしも防食性能上十分な適性があるとはいえない。しかし，世界的にVOC（揮発性有機化合物）規制，環境保護対策等が望まれている今日，水系防食塗料に期待される役割は大きくなり，今後，海洋環境への適用も求められる可能性は大きいといえる。

海洋環境への適用に関しては他の防食塗装（例えばジンクリッチペイントなど）との組み合わせでこの種の塗装工法を有効的に活用する必要がある。

c) モニタリング

各塗装システムによって結果はそれぞれ異なっているが，概ね以下に示すデータの範囲内にある。なお，具体的な測定は塗装系により塗膜のインピーダンスあるいは絶縁抵抗のどちらかで実施されている。

インピーダンス測定の $\tan \delta$ の値は概ね0.2～1.4の範囲であったが，一部のものに2.7, 3.7と大きな値を示したものが認められた。これは杭の位置関係や測定条件がある程度影響しているものと推定される。これまでの測定結果から，塗膜抵抗の差（鋼材の腐食の有無）をインピーダンスの値で判断するには， 10^{-2} ～ 10^{-1} Hzの低周波数域で測定することが必要であるとの知見を得た。そのため，今後の課題としては測定方法の見直しと標準化のための検討が必要である。

絶縁抵抗測定では，測定値はおおむね 10^6 ～ 10^9

Ωcm^2 の範囲であった。これらの測定値はポリエチレン系と同様に，現地の気象条件，塗膜表面の湿潤程度，測定時の条件により大幅に測定値が変動する傾向があり塗膜そのものの絶縁抵抗値を反映したものとはいえ難い。

今後，絶縁抵抗測定の信頼性を向上させるためには，方法・測定条件等の設定について検討が必要と思われる。

d) 付着強度

超厚膜エポキシ樹脂塗料，ガラスフレーク入り塗料，エポキシ樹脂塗料の塗装系では3～6N/mm²の付着強度が保持されている。

水系厚膜防食材では1.6N/mm²の付着強度であった。

e) 色調

基本的にはそれぞれの防食塗料のオリジナルな設計色（オリーブ，グリーン，グレー，白等）となるが，色の選定では特に大きな制限はない。また，上塗との組み合わせで自由な色彩設計が可能である。

前述のようにそれぞれの塗装工法は一部を除き防食性能上は健全な状態にあるが，美観に注目すると必ずしも初期の状態がそのまま保持されているとはいえない。美観上の変化の主なものとはチョーキングであり，南側や外側に位置し比較的紫外線の影響を受けやすい方向で試験開始後数年経過したところから認められた。チョーキングが認められるものはエポキシ樹脂塗料やガラスフレーク入り塗料で塗装系を構成し，特に美観保持を考慮した上塗塗装を採用していないものである。長期にわたって施工時と同程度の美観を維持するには，本試験で多く採用されたポリウレタン樹脂系塗料やふっ素樹脂系塗料のように高耐候性の上塗りを組み合わせた塗装系の採用を考慮してゆくことが望ましいといえる。

f) 適用範囲

耐食性，耐衝撃性，耐摩耗性などに優れ，海洋鋼構造物の海上大気中，飛沫帯などへの適用が好ましい。ただし，水系厚膜防食材や一部のエポキシ樹脂系塗料などに適用範囲を海上大気中に限定されるものもある。

g) 施工性

工場におけるスプレー塗装から現地でのはけ・ローラー塗装まで，各工法によって様々である。これらの施工方法は特に限定されるものではなく，施工条件によって選択することが可能である。

h) 補修・更新

補修はエポキシ樹脂系の防食塗料によって行なわれるのが一般的である。ガラスフレーク系塗料も補修に適用することが可能である。海水中については水中硬化型（水中施工型）エポキシ樹脂系塗料に限

定される。

1) 総合評価

塗装系として採用されているものは以下のように分類できる。

① ガラスフレーク入りポリエステル樹脂系塗料

(700~1000 μ m)

② ガラスフレーク入りエポキシ樹脂系塗料

(700~1000 μ m)

③ 超厚膜エポキシ樹脂塗料(1000~2000 μ m)

④ タールエポキシ樹脂塗料, その他(300~500 μ m)

これらの塗装系の下塗り塗料にはジンクリッチペイントを適用することが防食上有効である。また美観の面からは、チョーキングを防止するためにはポリウレタンやふっ素樹脂などによる上塗りが効果的である。

(5) 無防食杭の腐食傾向

汀線付近に位置する杭No. 3の腐食速度は飛沫帯で0.4~0.5mm/yで通常の港湾環境よりもやや大きく、杭No. 16の海水中では0.1~0.15mm/yと一般的な腐食速度と変わりなかったが、海底面近傍では砂の摩耗による影響がみられ0.45mm/y以上と大きい箇所が認められた。

4. まとめ

(1) 有機ライニングは、全ての工法について使用実績があり、10年間大きな異状もなく良好な状態を保持しているので優れた被覆防食工法であるといえる。

(2) 無機ライニングは工法の選定、立地環境や施工環境、耐用年数、経済性等について検討し、その工法の特徴を生かした選定が必要である。無機ライニング工法の特徴は、新設、既設にかかわらず適用することができ、海水中施工も可能である。電着工法の適用範囲は、干満帯、海水中に限定されるが、GRCカバー工法、セメントモルタルFRPカバー工法、鉄筋コンクリート巻き工法では海水中、大気中を問わず施工が可能である。無機ライニングの防食層は他の工法に比べ強固であり、大きな外力を受ける場所に適した工法といえる。ただし、保護カバー(補強カバーを含む)を使用する工法では、カバーの材質、厚さ、カバー固定用バンド等の耐久性を十分考慮した材質のものを選定するとともに構造にも十分な配慮が必要である。

(3) ペトロラタムライニングは、各工法とも良好な防食状態が維持されている。保護カバーの色は若

干、退色し、チョーキングの現象が認められるが、防食効果に影響はない。保護カバーの損傷事例は10年間で4件あったが、いずれも試験を開始してから3年の間に発生している。原因は流木等の衝突によるものと推定された。この教訓を生かして補修時に保護カバーの板厚を厚くする等の改善策を講じた結果、それ以降の損傷は発生していない。内湾環境では保護カバーの板厚(ウエブ部)は1.5~2mmでも10数年経過後も損傷を受けていない実績がある。しかし、本海域のような高波浪の外洋環境下では材質や板厚等を考慮した設計が必要となる。本海域における実績から推測すると外洋環境下での保護カバーの厚さ(ウエブ部)はFRPカバーで3mm程度、ポリエチレン製のカバーでは5~6mm、チタンカバーでは1mm程度の厚さにすれば長期間の耐用が可能と思われる。

(4) 塗装は、超厚膜エポキシ樹脂塗料、ガラスフレーク入り塗料、エポキシ樹脂塗料などの塗装系ではこれまでのところ防食性能面での異常や不具合は生じていない。ジンクリッチ塗料による下塗りをしていない水系厚膜防食材による塗装系は本環境条件における防食性能面では不十分な点がある。

(5) 防食層の防食効果をモニターするため各種の電気化学的方法による試験を行ったが、まだ改良の余地があることがわかった。

5. あとがき

本研究を開始した1980年代前半は、鋼材の腐食が原因で港湾鋼構造物が損傷を受け港湾荷役に影響を及ぼし大きな社会問題となった時期であった。そのため、様々な新しい防食工法・防食材料が開発され、実際の港湾構造物に適用され始めた時期でもあった。このような時期に本試験は、長いタイムスパンで技術改良・技術開発を行う意味も持たせてスタートした。当初の技術で十分な効果が確認できたものと、また、途中の過程でいくつかの試行錯誤を経て改良・改善された技術も多い。

10年間波浪の大きい過酷な海象環境に曝露され、この間途中で改良がなされて、その防食効果・耐久性が確認された工法および防食材料は防波堤等で囲まれた港内であればさらに長期間にわたり十分な効果が期待できる。

当初、本試験は外観観察、部分的剥離調査を基本に開始したが、その後の防食分野における各種モニタリング技術の開発・向上に伴い、本試験においても試験途中からそれらの適用を試みた。しかし実験

室内ではその効果，有効性が確認されている手法も，湿度や気温のコントロールが不可能な現場ではまだ改良すべき点が多く残されていることが明らかとなった。本試験では，今後とも防食材料の経年劣化の追跡調査を続けるとともに，モニタリング手法の改良に取り組むことにしている。

最後に，本研究は運輸省港湾技術研究所，(財)沿岸開発技術研究センター，鋼管杭協会の共同研究として進められている。本成果は，その立案，施工，調査，維持管理などの各段階で本研究に携わられた多くの方々の努力のたまものである。また観測棧橋に常駐している港湾技術研究所漂砂研究室の方々には，当該海域の気象・海象のデータを提供していただくとともに，本調査の実施にあたり種々の便宜供用をいただいている。これらの多くの方々に心より御礼申し上げる。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻)，pp. 237～253，1989.
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)，1997. 4.
- 3) 阿部正美，福手 勤，山本邦夫：鋼管杭の防食工法に関する現地試験(中間報告)，港湾技研資料，No. 675，p. 131，1990. 6.
- 4) 福手 勤，阿部正美，木原一禎，栗栖孝雄，土居一

- 幸：海洋環境における有機ライニングの耐久性，防錆管理，Vol. 40, No. 9, pp. 290～295, 1996. 9.
- 5) 熊田 誠，久保 淳，宮崎芳明，佐々木晴敏，福手 勤，阿部正美：波浪海域における鋼管杭の電着防食，第37回腐食防食討論会講演集，A-301，pp. 85～88，1990. 8.
 - 6) 福手 勤，阿部正美，上園 晃，木原一禎，栗栖孝雄，清水一夫：過酷な海洋環境(波崎)におけるペトロラタムライニング工法の耐久性，防錆管理，Vol. 41, No. 7, pp. 234～240，1997. 7.
 - 7) 井沢多加志，加門稔邦，吉田耕太郎：海洋構造物用重防食塗膜の調査方法，第4回防錆防食技術発表会予稿集，pp. 79～82，1984. 7.
 - 8) 今喜多美方，梨子国男：海洋鋼構造物飛沫・干滴帯の被覆防食，防錆管理，pp. 12～18，1979. 9.
 - 9) 喜田大三，守屋正裕：防食テープの耐衝撃性に関する実験検討，防錆管理，pp. 8～12，1982. 11.
 - 10) 日本規格協会：JIS Z 1902-1987 ペトロラタム系防食テープ
 - 11) 福手 勤，阿部正美，杉本達彦，栗栖孝雄，飯田眞司：海洋環境条件における鋼構造物のための厚膜防食塗装システムの防食効果と耐久性，第19回鉄構塗装技術討論会発表予稿集，pp. 99～106，1996. 10.

(1998. 7. 27 受付)

LONG TERM PERFORMANCE OF CORROSION PREVENTION COUNTERMEASURES FOR MARINE STEEL STRUCTURES

Tsutomu FUKUTE, Masami ABE, Shouji MANABE and Takao KURISU

It is indispensable to use corrosion prevention countermeasures for marine steel structures. In order to evaluate the long term performance of corrosion prevention methods, it is most reliable at this moment to continue the periodical monitoring of corrosion prevention performance of full scale marine steel structures. The authors have been monitoring time-dependent change of corrosion prevention effects of several kind of corrosion prevention methods. From the ten years monitoring, the following results were obtained. (1) Most methods show good performance (2) Protection cover should be enough against wave force (3) Zinc-rich undercoating is necessary for painting system (4) Electro-chemical monitoring methods need to be improved.