

鋼管杭防食工法の長期海洋暴露試験

Long-Term Marine Exposure Test for Corrosion Control of Steel Pipe Piles

芥川博昭*・宮田義一**・中野啓眞***

AKUTAGAWA Hiroaki, MIYATA Yoshikazu and NAKANO Hiromasa

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前(独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究室 研究官

*** 鋼管杭協会 技術委員

Corrosion of steel structures in coastal area is inevitable. To investigate the effects of anti-corrosion works, many types of protection methods are performed on steel pipe piles that are constructed in the coast of Kashima-nada, Japan. The field experiment has been continuing for 20 years. The year before last, a comprehensive survey conducted as a summary of 20 years experiment.

Key Words: marine environment, steel structure, steel pipe pile, corrosion protection method, corrosion

1. はじめに

鋼材は、社会基盤施設の整備に欠かせない建設材料であり、港湾施設や海洋構造物にも広く適用されている。しかし、海洋・港湾鋼構造物は厳しい腐食環境に位置することが多く、構造物の安全性や機能の低下を回避し、長期に渡って健全な状態に維持するためには、十分な腐食対策が必要不可欠である。

1970年代までは腐食対策工法の重要性が十分に認識されておらず、1981年に公共の栈橋・埠頭で、集中腐食が原因で突発的な座屈崩壊現象が発生した。このような背景から、1980年代の初めに数多くの防食工法が開発された。

防食工法の効果や耐久性を確認する方法としては、実海洋環境において暴露試験を行い、長期的に観測することが最も信頼性が高い方法であると言える。本研究では、防食工法の効果を確認するために、海洋環境に位置する実構造物の鋼管杭に各種防食工法を適用し、1984年より現地での暴露試験を実施してきた。

本報告は、暴露試験の開始以来一昨年で20年を迎えたことを契機に、これまでの研究成果¹⁾をとりまとめ、報告するものである。

2. 研究体制

本研究は鋼構造物の防食技術の向上を目的に1984年度から開始した、運輸省港湾技術研究所〔現(独)港湾空港技術研究所〕、(財)沿岸開発技術研究センター〔現(財)沿岸技術研究センター〕、鋼管杭協会の三者による共同研究「鋼管杭の防食法に関する研究」である。また、各防食工法の担当会社として、前記共同研究三者に加え、13社の民間会社が参加している(平成18年6月現在)。

共同研究の中核となる暴露試験については、定期的な毎年の調査を実施しており、年度ごとに報告書をまとめ、

その都度対外発表等を行い、研究成果の情報発信を行ってきた。

3. 海洋暴露試験の概要

3.1 暴露試験に用いた栈橋の概要

本研究の長期海洋暴露試験に用いている施設は、茨城県鹿島郡波崎町(現 神栖市須田浜地先)に位置する波崎海洋研究施設砕波帯観測用栈橋である。

本栈橋は運輸省港湾技術研究所(当時)が、砕波帯における底質の移動、海底の変形、海浜流の観測などを目的として、1982年から1985年にかけて建設したものであり、太平洋に面した海浜に沖合に向かって直角に突き出すように建設されている。(写真-1)



写真-1 波崎観測栈橋

栈橋の全体図を図-1に、標準断面図を図-2に示す。図-1の断面図の下に示した数字は鋼管杭No.を表わしている。栈橋の全長は427m、陸側先端は砂浜に位置し、沖合先端の水深は約5mである。図-2に示すように直径600~800mmの鋼管杭の上にコンクリート上部工があり、その上にPC桁を乗せた構造となっている。

また栈橋が位置するこの海岸は砂の移動が大きく、鋼管杭を砂による磨耗から防ぐため、直径900mmあるいは

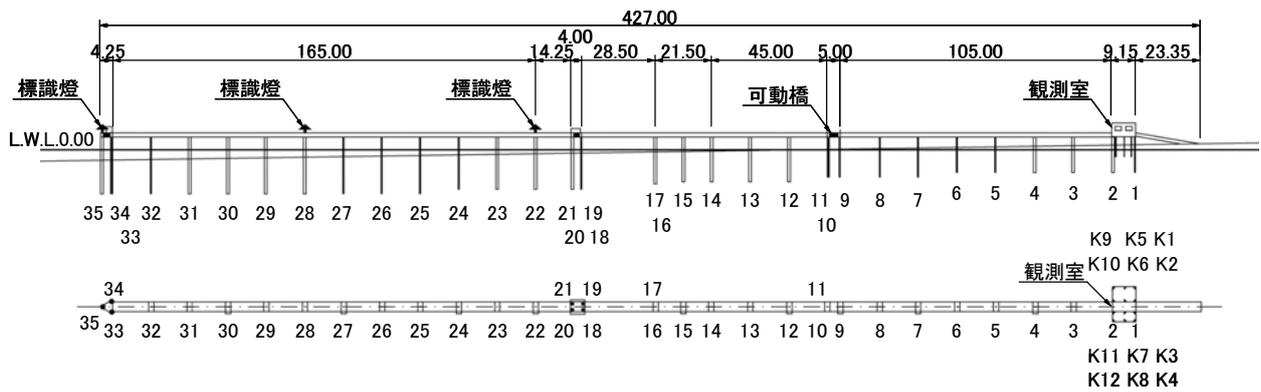


図-1 栈橋全体図

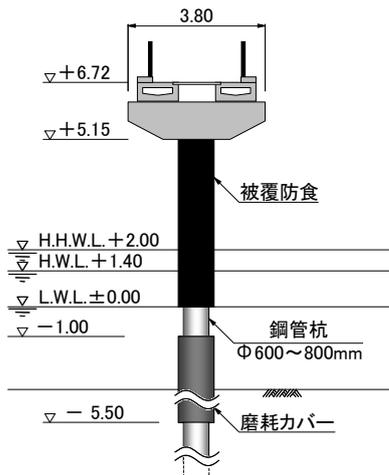


図-2 荒天時の波崎観測栈橋

1000mmの磨耗カバー（鋼製、長さ4.5m、肉厚6mm）を鋼管杭に取り付けている。

3.2 栈橋を取り巻く海洋環境

本栈橋は防波堤などの構造物がなく、直接外洋の大きな波や潮流にさらされ、海底の砂が大きく移動する波砕帯を含む海域に建設されている。栈橋先端位置での有義波高は最大で約3mであり、同海域の沖波波高と比較して波高は比較的小さいが、これは栈橋先端位置の水深が5~6mと浅く、大きな波は栈橋の沖合で砕波するためである。栈橋延長に砕波帯の占める割合は、平穏時に陸側の5分の1程度、荒天時には栈橋の全域が砕波帯

となるため、複数発生する砕波位置付近では、波高は小さくとも巻波砕波となり、鋼管杭に衝撃的な力を及ぼすことがしばしばである。

このように本栈橋は、通常防食工法が適用される港湾構造物の建設位置と比較して、海象条件の厳しい場所に位置しており、防食工法の暴露試験場としては極めて厳しい環境であると言える。

3.3 試験対象とした防食工法

20年間を超える暴露試験期間においては、様々な防食工法の試験が試みられてきたが、今回は20年間試験を継続した防食工法について、その試験結果を報告する。これらの防食工法および適用した鋼管杭を表-1に示す。

防食工法の分類としては、塗装・有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペトロラタムライニング工法、電気防食工法の4種類に大別される。以下にこれらの防食工法について詳述する。

(1) 塗装・有機ライニング工法

塗装・有機ライニング工法は、有機高分子材料を鋼材表面に被覆し防食する工法である。液体状あるいは半液体状の状態に施工するものや、高分子材料を加熱することにより熔融状態にして施工するものなどがある。

本暴露試験では、①エポキシ樹脂系塗料を気中で厚塗り施工する「超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法」、②ポリエチレンシートを工場で鋼材に被覆施工する、「ポリエチレンライニング工法」、③ペイントタイプまたはパテタイプ

表-1 試験に使用され20年間を経過した防食工法および適用杭

防食分類	工法名	鋼管杭No.
塗装・有機ライニング工法	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	K2, K3
	ポリエチレンライニング工法	31, 32, 33, 34, 35
	水中硬化型ライニング工法	6, 7, 9, 10, 11, 18
	極厚マスチック防食工法	27, 28
無機ライニング工法	電着工法	9, 10, 11
	CRUS工法	29
ペトロラタムライニング工法	チタンカバー工法	6
	ポリエチレン樹脂カバー工法	3, 13, 14,
	FRP樹脂カバー工法	12, 19, 22, 24, 25
電気防食工法	流電陽極方式（アルミニウム合金陽極）	22, 23, 26, 30

ブの水中硬化型塗料(エポキシ樹脂, タールポリウレタン系樹脂, 不飽和ポリエステル系樹脂など)を鋼材に塗布して施工する「水中硬化型ライニング工法」, ④型枠を鋼管杭の防食範囲の外周に組立て, 型枠内部に粘度の高いエポキシ樹脂を圧入する, 「極厚マスタック防食工法」の4工法を試験対象とした。

(2) 無機ライニング工法

無機ライニング工法は, セメントモルタルやコンクリートなどの無機系の材料で鋼材を被覆する防食工法である。

本暴露試験では, ①海水中に含まれるカルシウムイオンやマグネシウムイオン等を, 通電することにより無機系の電着物として鋼管杭に強固に付着させる「電着工法」, ②鉄筋コンクリート層と鋼管杭を, 鋼管杭に溶接された水中スタッドで強固に一体化することで, 防食効果と補強効果を兼ね備える「CRUS工法」の2工法を試験対象とした。

(3) ペトラタムライニング工法

ペトラタムライニング工法は, 石油を減圧蒸留した残渣物から分離生成して得られたイソパラフィンを主成分とするペトラタムを防食層に用いた工法である。施工の際はペトラタムペーストおよびペトラタムを含ませたテープを直接鋼材面に被覆し, その防食層の外周に保護カバーを取付ける。保護カバーは素材に工夫を凝らしたものが各種開発されて用いられている。

本暴露試験では, ①耐食性, 耐衝撃性に優れたチタンを保護カバーとして使用する「チタンカバー工法」, ②ポリエチレン樹脂をカバー材として鋼管杭に巻き付け, 接合部を熱融着で固定装着する「ポリエチレン樹脂カバー工法」③FRP樹脂を保護カバーとして使用する「FRP樹脂カバー工法」の3工法を試験対象とした。

(4) 電気防食工法

電気防食工法は, 鋼材に直流電流を流してカソード分極させ, 防食領域にまで電位を卑化して防食する方法である。本工法は, 流電陽極方式と外部電源方式の2種類に大別され, 本暴露試験では前者の「流電陽極方式」を試験対象とした。

なお, 港湾鋼構造物の防食に用いられる流電陽極方式は, 一般的にアルミニウム合金陽極を鋼材と電氣的に接続して, 両者の電位差による電池作用で防食電流を鋼材へ供給して防食する方式が主流である。

4. 暴露試験結果

前章で紹介した10種類の工法について, 20年以上にわたる暴露試験を実施し, 全ての工法について十分な防食効果, 耐久性を保持していることを確認した。以下に試験結果について詳述する。

4.1 塗装・有機ライニング工法

塗装・有機ライニング工法については, 外観観察, 付

着力試験, ライニング材の強度試験, 塩化物イオン浸透深さ測定, 絶縁抵抗測定などを実施した。

防食層の外観は, 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法と水中硬化型ライニング工法で極軽度のチョーキングが確認された以外は異状は確認されず, 上記2工法を含む全ての工法で鋼材表面の素地に腐食は発生しておらず防食状態は良好であった。写真-2にポリエチレンライニング工法のライニング材を除去した後の鋼材表面の状況を示す。



写真-2 ポリエチレンライニング下の鋼材表面

また, 付着力などの強度試験の結果, 施工当初と比較して著しい強度低下は確認されなかった。ただし, 極厚マスタック防食工法については, 一般的な施工事例と比較して若干付着力が小さいことが確認された。施工当初の付着力を測定していないため, 経時的な変化は確認が不可能であるが, 不十分な素地調整が原因であったのではないかと推察される。

また, 有機・塗装ライニング工法の非破壊モニタリング手法として, 絶縁抵抗の測定が有効であると考え, 本暴露試験でも測定を実施した。絶縁抵抗は $10^8 \Omega$ 程度の高抵抗となるため, 測定する際の漏洩電流の影響が無視できない。そのため測定精度の向上を目的として, 測定面をボックスで覆い, シリカゲルや窒素ガスなどを封入して環境を遮断する, いわゆる環境遮断法による測定を導入し, 一定の効果を得ることができた。

4.2 無機ライニング工法

無機ライニング工法については, 外観観察, 防食層の成分分析, ライニング材の強度試験, コンクリートの中性化試験を実施した。

外観観察においては, 電着工法について干満帯で数カ所の点錆・錆汁が確認され, CRUS工法でコンクリート表面の2~3mmの減耗が確認されたもの, 大きな損傷はなく, 鋼材表面素地にも腐食は発生しておらず, 防食状態は良好であった。

電着工法の防食層である電着物の強度は, 組成比率 ($\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$) が指標となることが知られている。すなわち CaCO_3 の含有比率が増加すると脆くなり, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の含有比率が増加すると柔らかくなる傾向となる。強度的に最適な組成比率は一般に約1.5程度と言われているが, 成分分析の結果, 施工直後より21年経過まで組成比率は表-2に示すようにほぼ一定であり, 電着物の物理的

強度も安定していると判断される。

表-2 電着物の組成比率(CaCO₃/Mg(OH)₂)

経過年数	測定項目	組成比率 (mass%)
	施工直後	1.56
	16年後	1.55
	21年後	1.55

また、CRUS工法については、被覆コンクリートの圧縮強度試験の結果、21年経過後の現在においても配合強度を超える圧縮強度を維持している他、コンクリートの中性化の進行についても、コンクリート標準示方書の予測式に近い下回る結果となった。

4.3 ペトラタムライニング工法

ペトラタムライニング工法については、外観観察、カバー材の強度試験、防食層の油分残存率測定、試験片による防食効果の確認を実施した。

外観観察の結果、カバー材についてはチタンカバー工法で表面が錆色に変色している箇所が確認されたものの、カバーの装着状態、またカバー開放後の鋼材表面素地には腐食は認められず、良好な防食状態が維持されていた。なお、チタンカバーの変色部については、EPMA(電子プローブマイクロアナライザー)による元素分析を実施したところ、錆色部では多くの鉄が検出され、カバー自体の発錆ではなく、仮設金物などの鋼材による流れ錆であることが判明した。

また、各工法のカバー材の強度試験の結果、概ね規格値を上回る強度が得られたが、FRP樹脂カバーに関しては曲げ強度は規格値以上であったものの、引張強度が規格値を1~2割下回る結果となった。引張強度の低下は特に干満帯付近で顕著に確認されたことから、波の衝撃を繰り返し受け続けることによる強度低下が主要因であると思われる。故に本試験環境のように波の影響が大きな海域でFRP樹脂カバー工法を適用する際には、カバー材の強度の経年的な低下に留意する必要があると言える。

一方、防食層の油分残存率は、海中部で90%を下回ることが多かったものの、概ね90%以上となり、防食層と鋼管杭の間に埋め込んだ試験片の防食効率がほぼ100%に近かったことから、カバー材の劣化は防食効果の低減に直接は結びつかないと言える。

4.4 電気防食工法

電気防食工法については、鋼管杭の電位と陽極の発生電流の計測、鋼管杭の肉厚測定、定電位試験、試験片による防食効果の確認を実施した。

電位・電流の計測の結果、通電中の鋼管杭の電位は防食電位よりも卑値となり、安定した防食状態にあることが確認された。また、鋼管杭の肉厚測定の結果から得られた、無防食杭と電気防食杭の腐食速度の比較結果を図

-3に示す。電気防食の防食効率は水中部で約90%程度となり、電気防食工法が有効であることが確認された。ここで、特筆すべき事項としてM.S.L.~H.W.L.の干満帯でも電気防食の効果が確認されたことが挙げられる。現地のような高波浪環境下では、干満帯にも波がかかり電気防食の効果を見込むことが出来ると言える。

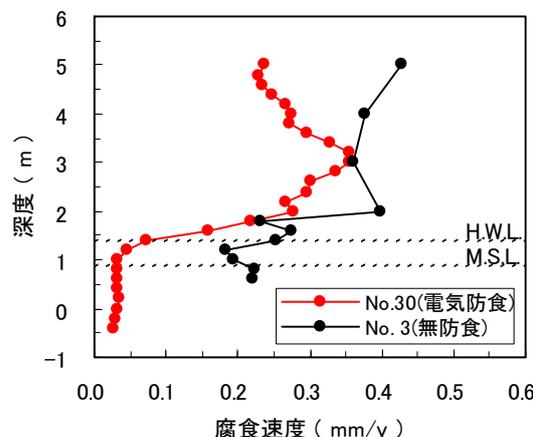


図-3 無防食杭と電気防食杭の腐食速度比較

また、適切な電位を維持しつつ、防食電流密度を短期間に低減できれば陽極の延命を図ることが可能となる。本試験では定電位試験を実施し、一般的な防食電位の基準-780mV(vs. Ag/AgCl-EL)に対し、電位を-800~-900mVの範囲で設定し、電流密度の低減傾向を確認した。その結果、防食電位を-900mVとした場合に、早期に電流密度が低減することが判明し、今後の電気防食の設計に役立つものと考えられる。

5. おわりに

今回、実構造物の長期暴露試験により、各防食工法の長期耐久性・防食効果を確認することができた。このような現地における長期暴露試験は、世界でも貴重な試験であると言え、今後も継続30年を目標に試験を継続していくと共に、防食技術およびモニタリング技術の改良・開発を行っていきたいと考えている。

さらに、新しい防食工法に対して防食工法の研鑽の場として、試験場を提供することも検討しており、実際に今回紹介した防食工法以外にも、耐海水性ステンレス鋼や、耐食アルミニウム、特殊ウレタン樹脂などを用いた防食工法が暴露試験を開始している。これらの新工法については今後調査を継続していく予定である。

最後に、本報告は(独)港湾空港技術研究所、鋼管杭協会および関係各社の共同研究でとりまとめたものであることを付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮田ら:鋼管杭の防食工法に関する現地試験(20年目の中間報告), 港湾空港技術研究所資料, No. 1123, 2006.