

鋼管杭防食工法の長期海洋暴露試験(35年経過時の報告)

片上 智之*・高野 誠紀**・山路 徹***

* 前(一財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

**前(一財)沿岸技術研究センター 研究主幹

*** (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
構造研究領域長 材料研究グループ長併任

鋼材は社会基盤施設の整備のために重要な建設材料であり、海洋・港湾構造物にも多く適用されている。しかし、鋼材は腐食という欠点を有するため、その機能及び性能を十分に発揮するためには、適切な防食技術が不可欠である。

鹿島灘の海岸に建設された観測用栈橋では、社会インフラのメンテナンスの重要性が高まりつつある中、各防食工法の長期耐久性の検証に加え、防食工法の性能評価・劣化予測に関する研究など様々なニーズに応えるべく、1984年より鋼管杭に各種防食工法を適用し暴露試験を実施している。

本報告は、暴露試験の開始以来今年で35年を迎えたことを契機に、これまでの研究成果を報告するものである。

キーワード：海洋暴露試験，栈橋構造，鋼管杭，防食工法

1. はじめに

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、構造物の機能や安全性の低下を回避し、長期に亘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、集中腐食が原因の座屈崩壊現象が発生した。このような背景から、1980年代の初めに多くの防食工法が開発された。

本研究では、様々な防食工法の効果を確認するため、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年より暴露試験を実施している。

また、1997年からは長期耐久性が期待できる素材についても適宜暴露試験を実施しており、チタン鋼やステンレス鋼等の高耐食性金属を保護カバーに用いた被覆防食工の暴露試験も実施している。

本報告は、暴露試験の開始以来今年で35年を迎えたことを契機に、これまでの研究成果^{1), 2)}を報告するものである。

2. 研究活動

本研究は鋼構造物の防食技術の向上を目的に1984年度から始まり、現在は、港湾空港技術研究所、(一財)沿岸技術研究センター、(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会、(国大)鹿児島大学、参画企業7社(関西ペイント(株)、(株)ナカボーテック、日鉄住金防食(株)、日本防蝕工業(株)、日本冶金工業(株)、吉川海事興業(株)、(株)金杉商工)の共同グループが、協定締結のもと、現地

での暴露試験を継続実施している(令和元年6月現在)。

共同研究の中核となる暴露試験については、毎年調査を実施しており、報告書をまとめるほか、定期的な対外発表等を行い、研究成果の情報発信を行っている。

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 波崎観測用栈橋

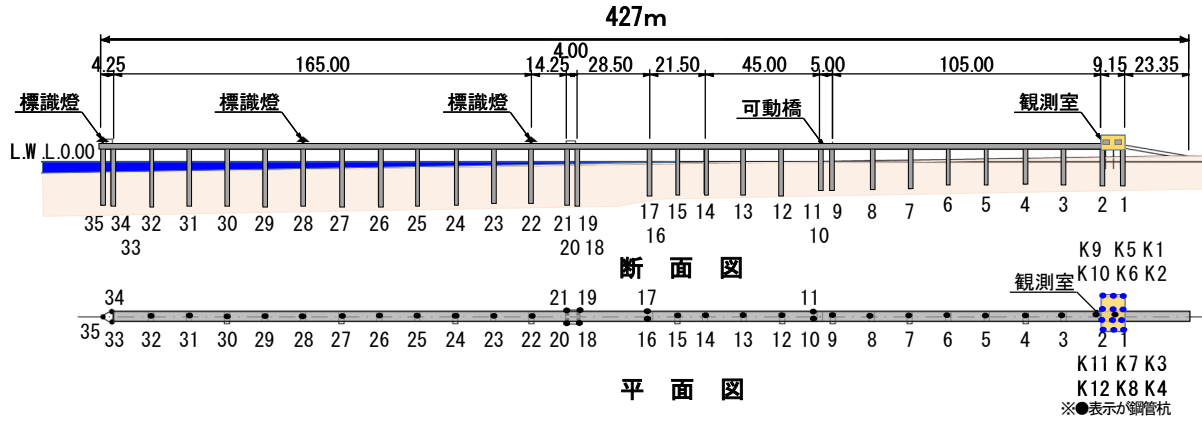


図-1 棧橋全体図

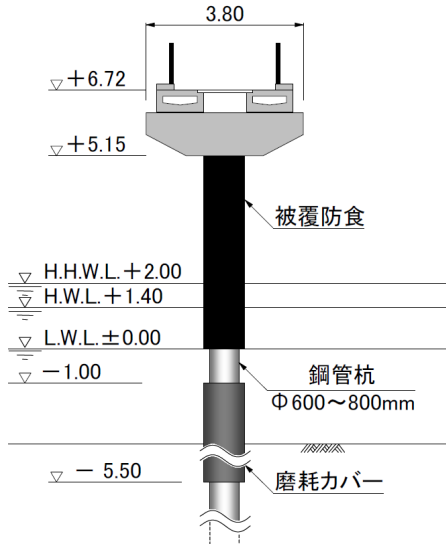


図-2 鋼管杭の標準断面図

棧橋の全体図を図-1に、鋼管杭の標準断面図を図-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。棧橋の全長は427m、陸側先端は砂浜に位置し、沖合先端の水深は約5.0m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桁を載せた構造となっている。また棧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 棧橋を取り巻く海洋環境

本棧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。棧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、これは棧橋先端位置の水深が5~6mと浅く、大きな波は棧橋の沖合で砕波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き波砕波となり、鋼管杭に衝撃的な力を及ぼすことがしばしばである。

このように本棧橋は、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いえる。

3.3 試験対象とした防食工法

本棧橋の鋼管杭に適用した防食工法には、①塗装、②有機被覆、③ペトロラタム被覆、④無機被覆、⑤電気防食がある。

本稿ではこれまでの防食試験の結果を報告する。これらの防食工法および適用した鋼管杭を表-1~5に示す。

(1) 塗装工法

塗装工法は、鋼材表面の下地にジンクリッチプライマー(亜鉛未含有塗料)等を塗布したのち、液体状あるいは半液体状の状態の塗料を塗布する工法である。

暴露試験中の塗装工法を表-1に示す。

表-1 塗装工法

工 法	杭No.
超厚膜型エポキシ樹脂塗料塗装工法	K1, K2, K3, K5
ガラスフレークエポキシ樹脂塗料塗装工法	K4, K8, K12
タールエポキシ樹脂塗料塗装工法/ノントールエポキシ樹脂塗料塗装工法	K6, K7
C5塗料系塗装工法	K9
ガラスフレークポリエステル樹脂塗料/ふっ素樹脂塗料塗装工法	K10
湿潤面用エポキシ樹脂塗料塗装工法	K11

(2) 有機被覆工法

有機被覆工法は、ポリエチレン樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂などの有機系材料により鋼材表面を被覆する防食工法で、塗装と比べ、膜厚が2~10mmと厚く施工される(表-2)。

表-2 有機被覆工法

工 法	杭No.
防食シート接着被覆工法	1, 2
チタン箔+重防食塗装工法	6
チタン箔+無溶剤塗装工法	7
水中硬化形被覆工法 (ペイントタイプ, パテタイプ: 水中用、湿潤面)	3, 7, 9, 15, 18, 27, 28
ポリエチレン被覆工法	31, 32, 33, 34, 35

(3) ペトロラタム工法

ペトロラタム工法は、ペトロラタム(石油系のワックスの一種)を主成分とする防食材およびそれらを保護するカバーの組合せによる防食工法であり、現場での適用が可能な工法である(表-3)。

表-3 ペトロラタム工法

工 法	杭No.
耐海水性ステンレスカバー	5, 22
FRPカバー工法	12, 14, 19, 20, 21, 24
APC工法(アクリル変成塩化ビニールカバー)	16, 22
チタンカバー工法	6, 10, 11, 23, 25, 26, 29, 30

(4) 無機被覆工法

無機被覆工法は、セメントモルタルや鉄筋コンクリートおよび金属を含む無機系の材料で被覆する防食工法である。セメントモルタルやコンクリートの持つ強いアルカリ性により被覆材内部の鋼材表面に形成される緻密な不動態皮膜により鋼材面が保護される。現場での適用が可能な工法である(表-4)。

表-4 無機被覆工法

工 法	杭No.
ダクタールカバーモルタル被覆工法	2
セメントモルタル/FRPカバー工法	4, 8
チタンカバーモルタル被覆工法	16
GRC補強カバー工法	17
鉄筋コンクリート被覆工法 (GRUS工法)	29

(5) 電気防食工法

流電陽極方式は、海水中および海底土中部にある鋼材(鋼管杭・鋼矢板など)よりも卑(マイナス側)な電位を持つ陽極(アルミニウム合金や亜鉛合金)を鋼材に接続し、異種金属間に生じる電位差、それによって流れる電流により鋼材を防食する方式である。なお、磁気吸着式とは、水中アーク溶接で流電陽極を固定する方法を磁気吸着式に改造したものである(表-5)。

表-5 電気防食工法

工 法	杭No.
流電陽極方式	2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31
磁気吸着式流電陽極方式	4, 24

4. 暴露試験結果

前章で紹介した各種工法について、現地暴露試験の結果について詳述する。

4.1 塗装工法, 有機被覆工法

塗装工法, 有機被覆工法について、暴露期間が30年以上経過している杭の外観を写真-2に示す。

塗装工法(杭No. K2, No. K8), 有機被覆工法(杭No. 18)

において、それぞれ一般部は防食状態を維持している。しかし、上部工コンクリート地際部、部分補修部、溶接ビード部では劣化因子が侵入し、発錆している状況が確認された。よって、劣化因子が侵入し易い端部や部分補修部、塗膜や被覆材の損耗が激しくなる凸部では防食工効果が低下する傾向があるため、定期的に点検し、部分的に対応する必要がある。



防食工法	No. K2 超薄膜型エポキシ樹脂塗装工法	No. K8 ガラスフレークエポキシ樹脂塗料塗装工法	No. 18 水中硬化型被覆工法
年 数	33年	32年	33年

写真-2 塗装工法, 有機被覆工法の外観

4.2 ペトロラタム被覆工法

ペトロラタム被覆工法(杭No. 5, 19, 29)の保護カバーの外観を写真-3(2018年撮影)に示す。なお、施工時期が異なるため、暴露期間はそれぞれ異なる。カバー材は概ね健全であった。上部工コンクリート地際部で発錆、保護カバーを固定するボルトなどの付属品で劣化しているものが確認された。



保護カバー	No. 5 耐海水性スチールカバー	No. 19 FRPカバー:FRP	No. 29 チタンカバー:Ti
年 数	16年	23年	18年

写真-3 ペトロラタム被覆工法の保護カバーの外観
ペトロラタム被覆の防食性能評価指標として、ペトロラタム材中の油分残存率が用いられており、80%が目安とされる³⁾。図-3に波崎観測栈橋および実構造物より採取した試料中の油分残存率と腐食の関係⁴⁾を示す。油分残存率が80%以上の場合でもごく一部で腐食が確認(19試料中3試料)された。一方で、油分残存率

が80%未満で腐食していないものが9割程度(11試料中1試料)であり、油分残存率と発錆の相関性が明確にはならなかった。この結果から防食材の油分消耗に起因しない発錆機構の存在が考えられる。今後、本防食工法の腐食機構や材料の劣化機構の解明等についての検討を進め、性能評価方法を確立させる必要がある。

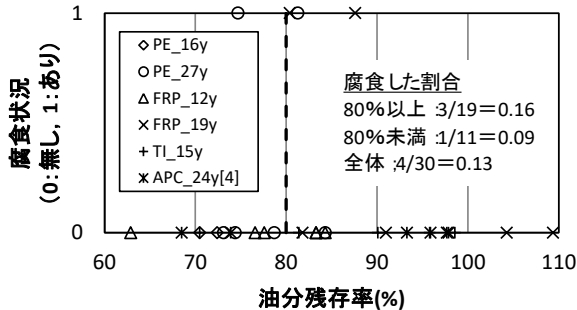


図-3 油分残存率と腐食の関係

4.4 無機被覆工法

無機被覆工法の一例として、No. 16 杭(チタンカバーモルタル被覆工法: 暴露期間 21 年)と No. 29 杭(鉄筋コンクリート被覆工法: 暴露期間 34 年)がある。共に外観上の異常は認められず、安定した防食状態を維持している(写真-4)。

海中および干満帯にある鉄筋コンクリート被覆では、塩化物イオンが鋼材表面において高濃度となっても鋼材表面に顕著な腐食は確認されないことやコンクリートと内部鋼材の界面から塩分が浸透することが考えられることから性能評価、劣化予測に関して定量的な劣化指標となるものがない状況である³⁾。今後、これらの課題に対して検討する必要がある。



No. 16 チタンカバーモルタル被覆工法 No. 29 鉄筋コンクリート被覆工法(CRUS 工法)

写真-4 無機被覆工法の外観

4.5 電気防食工法

電気防食工法として写真-5 に No. 4 杭に設置した磁気吸着方式アルミ合金陽極を示す。設置場所は、極端に水深の浅い位置にあり、通常の陽極が設置困難であるため、板状の Al 合金陽極を試験的に設置した。磁気吸着方式のアルミ陽極は、水中アーク溶接による固定が困難な場合や潜水作業時間の短縮を図る際に有用な工法として期待されている。



a) 板状アルミ合金陽極

b) 鋼板設置作業状況

写真-5 No. 4 杭 電気防食工法(磁気吸着方式)

表-6 No. 4 杭の電位測定結果

測定時期	電位(vs.Ag/AgCl[sw.])	電位(vs.Cu/CuSO ₄)
	防食電位: -780mV	防食電位: -850mV
1 か月後(8/11)	約-750mV	約-820mV
4 か月後(11/9)	約-695mV	

施工完了から約1ヵ月後(8月11日)及び4ヵ月後(11月9日)の電位測定結果を表-6に示す。施工4ヵ月経過後も防食電位に達してはいなかったが、電位は卑な方向に極値し、ある程度の防食効果は得られているものと推測される。防食電位に達しなかった原因として、陽極の数量不足が考えられる。また、陽極の設置環境は地盤高の変動が著しく、防食設計の知見が不足しているため、今後適正な防食設計手法を検討する必要がある。

5. まとめ

波崎観測栈橋での暴露試験の結果、被覆防食工法において、最大30年にわたり防食性能を発揮する工法を確認することができた。ただし、劣化因子が侵入しやすい被覆防食端部や保護カバーを固定する付属品に関しては劣化が確認された。このため、被覆防食端部や付属品等の弱点克服についても今後取り組む必要がある。

ペトロラタム被覆防食工法の油分残存率による防食機能の評価は、本研究において、油分残存率と発錆の相関性が明確になった。このことから、本工法の腐食機構や材料の劣化機構の解明について更なる検討が必要である。

磁気吸着方式による流電陽極の取り付けに関しては経過年数が短いため長期間の観察を行うと共に防食電位に達しなかった原因を追求し、改善する必要がある。

参考文献

- 1) 鋼管杭の防食法に関する研究グループ：鋼管杭の防食に関する研究(2017年度(平成29年度)及び2018(平成30年度)調査)報告書、同(2015年度(平成27年度)及び2016(平成28年度)調査)報告書。
- 2) (一財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)，2009。
- 3) 山路徹ほか：長期暴露試験に基づく鋼管杭の被覆防食工法の耐久性評価に関する研究(30年経過時の報告)，港湾空港技術研究資料No.1324，2016。
- 4) 藤井敦，佐藤徹，坂田憲治，山路徹，加藤絵乃：港湾の施設の点検診断および補修技術等に関する技術資料，国土技術政策総合研究所資料No.933，2016。