

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1324 June 2016

長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の
耐久性評価に関する研究（30年経過時の報告）

山路 徹・与那嶺一秀・審良 善和・阿部 正美・原田 典佳・田中 隆太
角野 隆・香田 一哉・金杉 賢・後藤 宏明・松田 英樹・江口 宏幸
松井 良典・岸 慶一郎・久保田一男・永尾 直也・星野 雅彦・川瀬 義行
小泉 文人・小林 裕・増田 和広・吉川 幸雄・中村 聡志

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 現地試験の概要	
2.1 現地試験に使用した栈橋の概要	7
2.2 栈橋の自然環境	8
2.3 試験に使用した防食工法	11
2.4 試験実施概要	14
2.5 20年の調査成果の概要	14
2.6 20年の調査結果の活用事例	16
3. 塗装工法	18
4. 有機被覆工法（水中硬化形被覆工法）	29
5. 有機被覆工法（ポリエチレン被覆工法）	36
6. ペトロラタム被覆工法	47
7. 無機被覆工法	58
8. 電気防食工法	68
9. まとめ	73
謝辞	74
付録A 調査研究年次計画とその進め方	A-1
付録B 防食工法の補修	B-1
付録C 各種防食工法データシート（施工の経過）	C-1
付録D 外観調査結果履歴	D-1

Studies on the estimation of durability of protective methods for steel pipe pile based on the long term marine exposure test (after 30 years)

Toru YAMAJI^{*1} · Kazuhide YONAMINE^{*1} · Yoshikazu AKIRA^{*2} · Masami ABE^{*3} · Noriyoshi HARATA^{*4} · Ryuta TANAKA^{*5} · Takashi KADONO^{*6} · Kazuya KODA^{*6} · Ken KANASUGI^{*7} · Hiroaki GOTO^{*8} · Hideki MATSUDA^{*8} · Hiroyuki EGUCHI^{*9} · Yoshinori MATSUI^{*10} · Kei-ichiro KISHI^{*10} · Kazuo KUBOTA^{*4} · Naoya NAGAO^{*4} · Masahiko HOSHINO^{*11} · Yoshiyuki KAWASE^{*12} · Fumito KOIZUMI^{*13} · Yutaka KOBAYASHI^{*14} · Kazuhiro MASUDA^{*15} · Yukio YOSHIKAWA^{*15} · Satoshi NAKAMURA^{*16}

Synopsis

As the corrosion protection method for marine steel structures, a cathodic protection method is applied in the submerged zone and below the sea bottom, a protective coating method is applied above the tidal zone. For these two methods, the establishment of the following methods is needed: 1) the performance verification method at the design stage, 2) the estimation method of protection performance at the present and the future.

On the other hand, the cathodic protection method and various protective coating methods are applied to the steel pipe piles in Hazaki oceanographical laboratory station. The long-term exposure test was started since 1984 and 30 years have passed in fiscal year 2014. In this study, to estimate the durability of each corrosion protection methods and to establish the performance verification method, various investigations were carried out. Main conclusions are below:

- (1) The outlines in the protective coatings are below: For painting and underwater cured coating, some deterioration was started after 20 year. For polyethylene coating, no apparent deterioration was observed. For petrolatum coating, some slight corrosion was observed inside some kind of protective cover after 20 year. For concrete coating, no deterioration was observed on the surface.
- (2) The electrochemical property such as impedance, insulation resistance and volume resistivity can be an index of the performance evaluation for painting and organic coating.
- (3) For the petrolatum and the concrete coating, some subjects in establishment of the deterioration index were picked out.

Key Words: steel structures, cathodic protection, protective coating, performance evaluation, future estimation

*1 Materials Group, Structural Engineering Department

*3 Former Researcher, Materials Group (KANASUGI Commerce and Industry Co, LTD.)

*5 Japanese Association for Steel Pipe Piles

*7 KANASUGI Commerce and Industry Co, LTD.

*9 Kubota Corporation.

*11 Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd.

*13 The Nippon Corrosion Engineering Co., Ltd.

*15 Yoshikawa-Kaiji Co., Ltd.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5103 Fax : +81-46-844-0255

*2 Former Researcher, Materials Group (Kagoshima University)

*4 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

*6 Coastal Development Institute of Technology

*8 Kansai Paint Co., Ltd.

*10 JFE Steel Corporation

*12 Nippon Steel & Sumikin Anti-Corrosion Co., Ltd.

*14 Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd.

*16 Coastal and Estuarine Environment Department

e-mail : yamaji-t@pari.go.jp

長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の

耐久性評価に関する研究（30年経過時の報告）

山路 徹^{*1}・与那嶺一秀^{*1}・審良 善和^{*2}・阿部 正美^{*3}・原田 典佳^{*4}・田中 隆太^{*5}・
角野 隆^{*6}・香田 一哉^{*6}・金杉 賢^{*7}・後藤 宏明^{*8}・松田 英樹^{*8}・江口 宏幸^{*9}・
松井 良典^{*10}・岸 慶一郎^{*10}・久保田一男^{*4}・永尾 直也^{*4}・星野 雅彦^{*11}・川瀬 義行^{*12}・
小泉 文人^{*13}・小林 裕^{*14}・増田 和広^{*15}・吉川 幸雄^{*15}・中村 聡志^{*16}

要 旨

海洋環境に位置する鋼構造物の防食方法として、海水中および海底土中部に対しては電気防食工法、干満帯より上部の環境には被覆防食工法が適用されている。この両工法に対して、①設計時に性能を照査する方法、②維持管理時に現状の防食性能を評価する方法および将来の性能低下を予測する方法の確立が求められている。電気防食工法については、概ね確立されているが、被覆防食工法については、いずれも未確立である。

一方、波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋の鋼管杭には、流電陽極方式電気防食工法および各種の被覆防食工法が適用されている。1984年から開始された長期海洋環境暴露試験は、2014年度に30年が経過した。本研究では、20年以上が経過した各種防食工法を主対象として、海洋環境下における各種防食工法の耐久性評価および性能評価手法の確立を目的として、30年経過時に各種調査を行った。主な研究成果を以下にまとめる。

(1) 主な被覆防食工法における、20年経過時（2004年度）からの変化の概要を以下にまとめる。

- ・塗装：耐候性に優れる上塗りを行っていない場合、塗膜表層部に劣化進行が確認された。ただし、厚膜形の種類については、塗膜下の鋼材腐食は開始していなかった。
- ・水中硬化形被覆（パテタイプ）：一部の種類の場合に軽微な鋼材腐食が開始していた。
- ・ポリエチレン被覆：20年からの変化は見られず、被覆材、鋼材いずれも健全であった。
- ・ペトロラタム被覆：各種のカバー材において、外観上は20年からの変化は見られなかったが、内部鋼材においては、一部の工法の場合に部分的に軽微な腐食が開始していた。
- ・コンクリート被覆：外観上は20年からの変化は見られなかった。

(2) 塗装、有機被覆（水中硬化形被覆、ポリエチレン被覆、）において、被覆材の電気化学特性（インピーダンス、絶縁抵抗、体積固有抵抗）が性能評価の指標となる可能性が示された。

(3) ペトロラタム被覆、コンクリート被覆において、防食性能を定量的に評価可能な指標の確立における課題が抽出できた。

キーワード： 海洋環境，鋼構造物，電気防食，被覆防食，性能評価

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| *1 構造研究領域 材料研究グループ | *2 元構造研究領域 材料研究チーム（現 鹿児島大学） |
| *3 元港湾空港技術研究所（現（株）金杉商工） | *4 新日鐵住金（株） |
| *5 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会 | *6 一般財団法人 沿岸技術研究センター |
| *7（株）金杉商工 | *8 関西ペイント（株） |
| *9（株）クボタ | *10 JFEスチール（株） |
| *11（株）ナカボーテック | *12 日鐵住金防食（株） |
| *13 日本防蝕工業（株） | *14 日本冶金工業（株） |
| *15 吉川海事興業（株） | *16 沿岸環境研究領域 |
- 〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5103 Fax：046-844-0255 e-mail：yamaji-t@pari.go.jp

1. はじめに

1.1 開始の経緯

鋼材は社会基盤施設の整備のために、非常に重要な建設材料であり、港湾施設、海洋構造物にも適用されている。しかし、鋼材は腐食という欠点を有するので、その機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。海洋環境における鋼構造物の防食方法としては、海水中、海底土中については電気防食が適用され、干満帯より上部の環境には、被覆材による防食が行われることが一般的である。従来干満帯より上部に対する防食工法としては、塗料による方法が多く、塗膜層の厚さも現在適用されているものに比べ薄く、塗装材料そのものの耐久性や防食効果は必ずしも十分でなかった。しかし、その後、耐久性や防食効果の高い各種被覆工法の開発が行われた。一方、防食工法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長期間暴露し確認することが最も信頼性の高い評価方法と考えられるが、十分な時間や場所を与えられていないのが実情であった。

そのため、1984年度（昭和59年度）に運輸省港湾技術研究所（現（国研）港湾空港技術研究所）、（財）沿岸開発技術研究センター（現（一財）沿岸技術研究センター）、鋼管杭協会（現（一社）鋼管杭・鋼矢板技術協会）は共同で鋼構造物の防食技術の向上のため、茨城県波崎にある波崎海洋研究施設砕波帯観測用栈橋の47本の鋼管杭を利用して、各種防食技術の防食効果および材料の耐久性に関する現地試験を開始した。対象とした防食技術は、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、電気防食、

塗装の5種類である。これらの防食法は、主に1983～1986年度（昭和58～61年度）にかけて施工されたものである。

対象とした栈橋は、防波堤に囲まれている一般的な港湾施設と異なり、年間を通じて太平洋の荒波を受け、しかも砂浜海岸であるため漂砂による磨耗作用を無視することができない等、極めて過酷な条件の環境にある。

1.2 20年までの状況

そして、長期にわたる暴露試験を継続し、2004年度には20年経過後の調査を実施した。その結果、被覆防食工法に関して、優れた性能を有するもの（超厚膜形被覆、ポリエチレン被覆、水中硬化形被覆、コンクリート被覆、ペトロラタム被覆等）に関しては、20年程度までの耐久性を有していることが示された。電気防食工法に関しては、サンドエロージョンに対する防食効果が期待できること等が確認された。

1.3 最近の動向（基準類）

一方、2007年度に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」が改訂され、構造物の保有性能が要求性能を満足することを、設計供用期間にわたって設計時点で照査する性能照査型設計が導入された。また、社会資本の維持管理に対する重要性が社会的に認識される中、すべての技術基準対象施設は、供用期間にわたって要求性能を満足するように、維持管理計画に基づき、適切に維持管理されることが法令上において規定された。ここで、維持管理の流れを図-1.1に示す。点検診断、保有性能評価と将来予測、対策工の選定、の一連の行為を適時適切に行う必要がある。

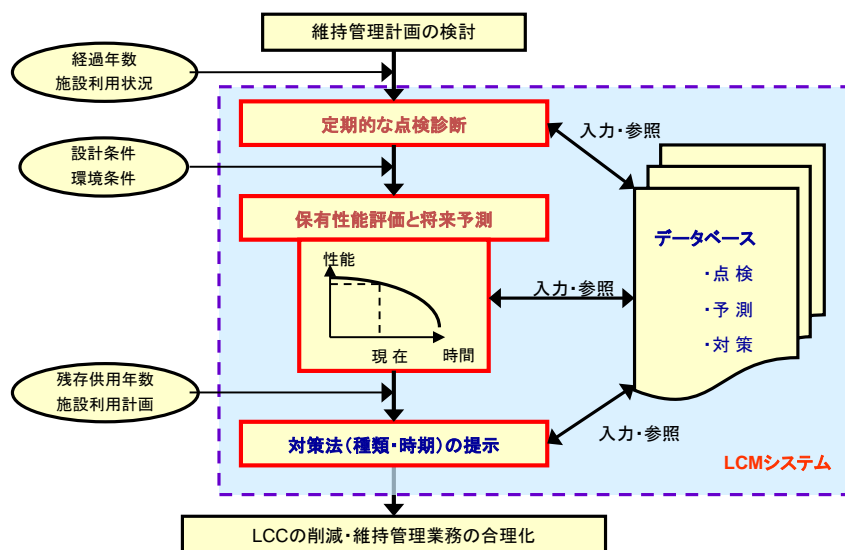


図-1.1 港湾施設の維持管理の流れ

上述の技術基準の改訂を受け、鋼材の防食に関して、まず設計時点では、鋼材の防食性能が供用期間にわたって満足することを照査する必要がある。すなわち、「①防食工法の性能照査型設計体系の確立」が求められている。そして、維持管理時においては、常に防食性能が機能していることを確認する必要がある。この際、防食性能の低下を予測し、防食性能が維持管理上の限界状態に至る前に、適切な補修を行う必要がある。すなわち、「防食工法の残存性能の定量的な評価手法の確立」や「防食性能の低下程度に応じた補修工法の選択手法の確立」といった、「②防食工法の維持管理手法の高度化」が求められている。

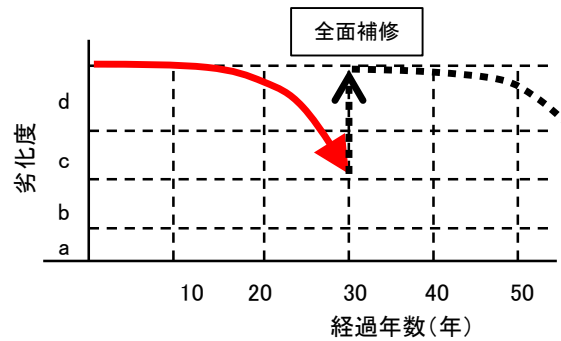


図-1.2 被覆防食工法の劣化予測¹⁾
(イメージ)

1.4 研究課題

ここで、「電気防食工法」においては、設計時に性能を照査する方法、維持管理時において現状の防食性能を評価する方法および将来予測を行う方法は概ね確立されている。

一方、「被覆防食工法」に関しては、各被覆防食工法の性能を設計時に照査する方法、維持管理時において現状の防食性能を評価する方法および将来予測を行う方法は未だ確立されていない。イメージとして、図-1.2のような図が示されることもあるが、実際に図中の劣化曲線を描くことは現状においては困難である。この現状にお

いては、港湾施設の維持管理計画（図-1.1参照）を作成する際に、被覆防食工法の期待耐用年数（2.6参照）を迎えた時点で、被覆防食工法の補修が計画される場合が多い。また、維持管理段階において、補修時期の設定や精度の高いライフサイクルコストの計算は困難である。

社会資本の維持管理の時代を迎える中、「被覆防食工法の性能照査型設計体系の確立」および「被覆防食工法の維持管理手法の高度化」、この2つの手法の確立は必要不可欠である。

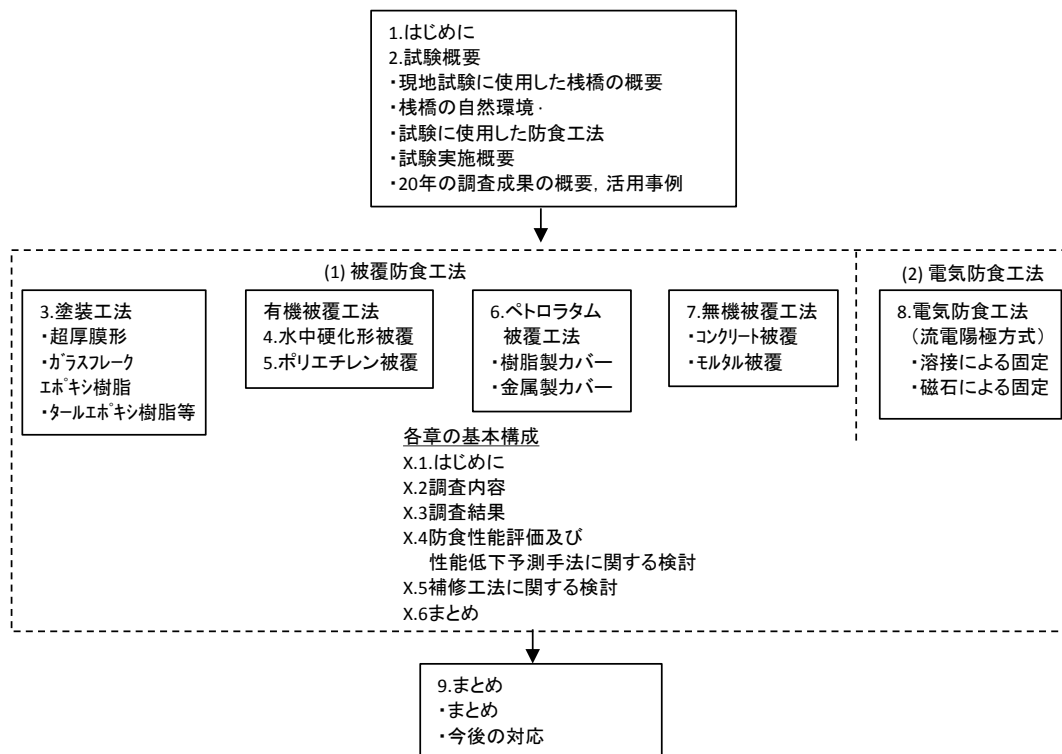


図-1.3 本論文の構成

1.5 30年経過時の調査概要

そこで、2014年度の30年経過時の調査においては、被覆防食工法に対しては、以下の①～④の検討を行うことを目的として、毎年実施している外観目視調査に加えて、各被覆防食工法の性能評価を目的とした各種詳細調査も実施した。また、補修工法の開発および性能の評価に関する検討も行った。

- ①被覆防食工法の耐久性（耐用年数等）の評価
- ②被覆防食工法の保有性能評価手法の検討（外観上の変状から評価する方法，機器などを活用した調査結果から評価する方法）
- ③被覆防食工法の性能低下予測手法の検討
- ④補修工法の開発検討

一方、電気防食工法に対しては、維持管理手法の高度化に関する検討や、新たな陽極設置方法に関する開発検討を行った。

1.6 本論文の構成

図-1.3に本論文の構成を示す。各工法毎に調査内容および結果、防食性能評価及び性能低下予測手法、補修工法について検討を行った。

参考文献

- 1) (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

2. 現地試験の概要

2.1 現地試験に使用した栈橋の概要

長期暴露現地試験には、砕波帯の研究施設である「波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋(以下栈橋と呼ぶ)」を使用している。栈橋の鋼管杭に各種防食工法を施工して、30年以上にわたり毎年現地調査を継続実施している。

この栈橋は、1982年～1985年にかけて建設された研究施設であり、主な研究目的は、砕波帯における底質の移動、海底の変形、海浜流などの観測である¹⁾。栈橋が設置された場所を図-2.1に示す。栈橋は、茨城県鹿島郡波崎町(現 神栖市須田浜地先)の海岸に位置し、この海岸線から直角に沖合に突き出ている。



図-2.1 栈橋の位置図

栈橋の全体図を図-2.2に、標準断面図を図-2.3に示す。図-2.2の断面図の下に示した数字は鋼管杭 No. を表す。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-2.3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 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。

栈橋の方位を図-2.4に示す。栈橋の海側は、北から東側に 59° の方向である。

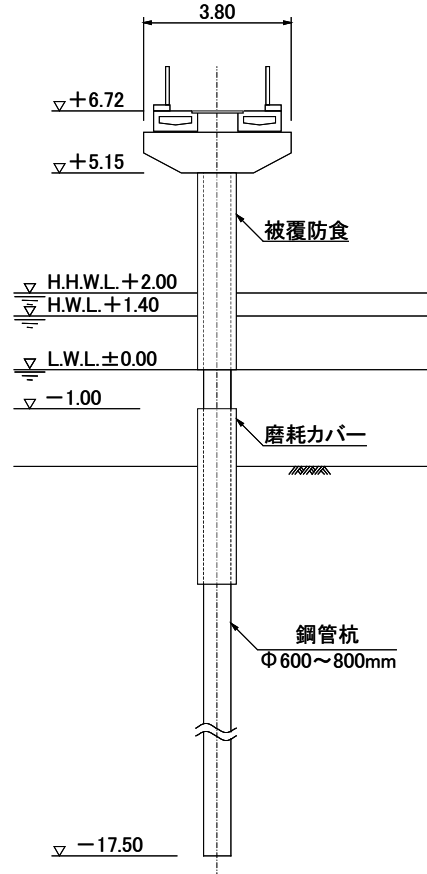


図-2.3 栈橋の標準断面図

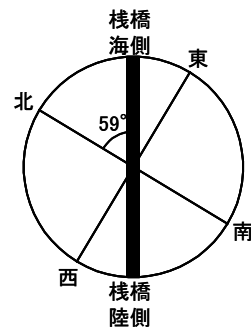


図-2.4 栈橋の方位

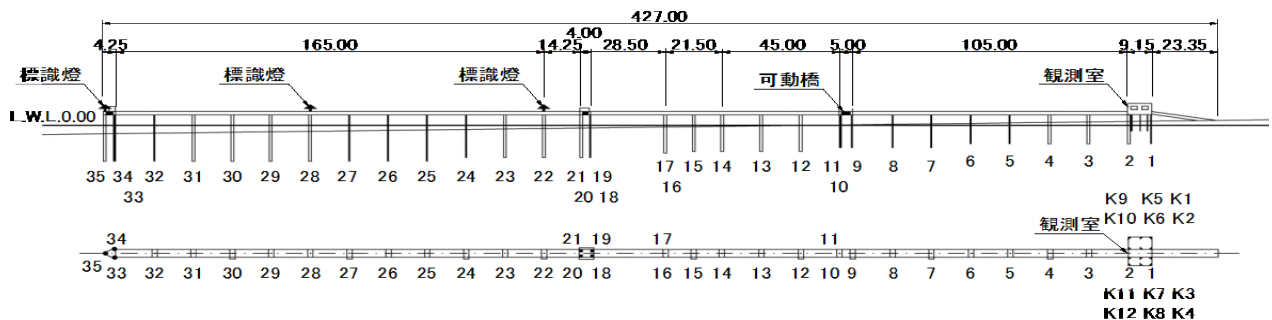


図-2.2 栈橋の全体図

←kashima (P50) choshi→

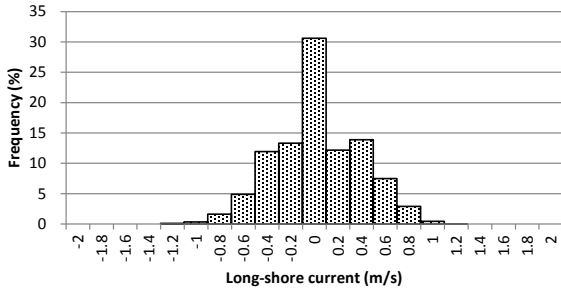


図-2.8 沿岸方向流速の頻度分布 (P50)

←kashima (P145) choshi→

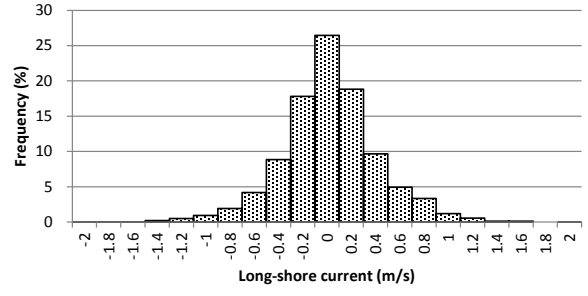


図-2.12 沿岸方向流速の頻度分布 (P145)

←kashima (P65) choshi→

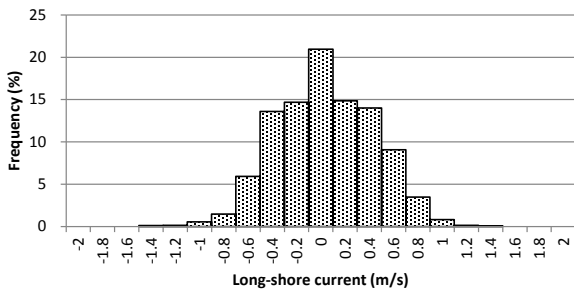


図-2.9 沿岸方向流速の頻度分布 (P65)

←kashima (P190) choshi→

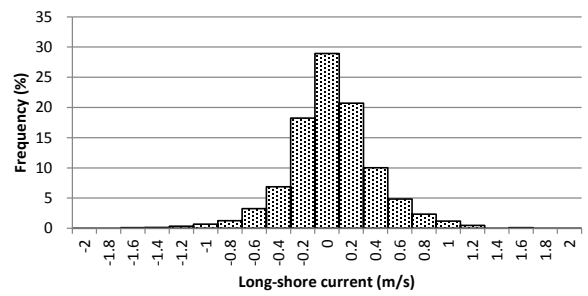


図-2.13 沿岸方向流速の頻度分布 (P190)

←kashima (P95) choshi→

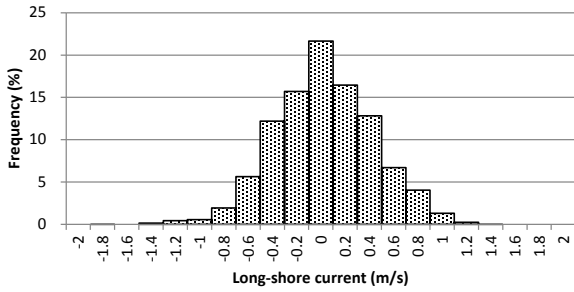


図-2.10 沿岸方向流速の頻度分布 (P95)

←kashima (P240) choshi→

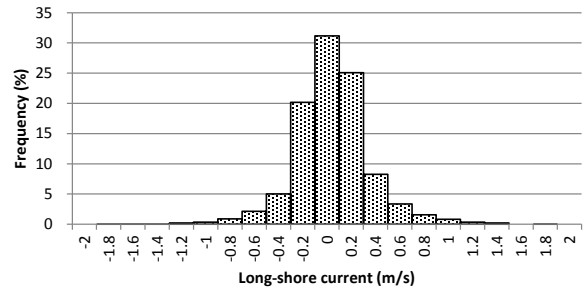


図-2.14 沿岸方向流速の頻度分布 (P240)

←kashima (P115) choshi→

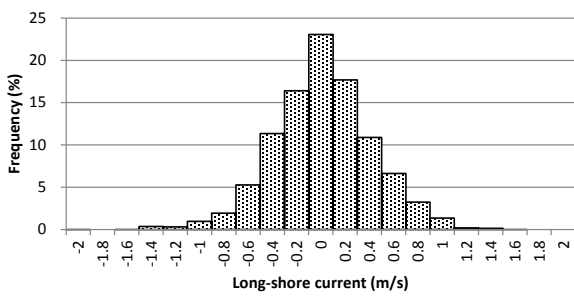


図-2.11 沿岸方向流速の頻度分布 (P115)

←kashima (P285) choshi→

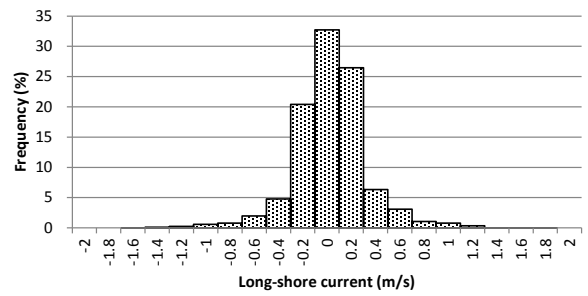


図-2.15 沿岸方向流速の頻度分布 (P285)

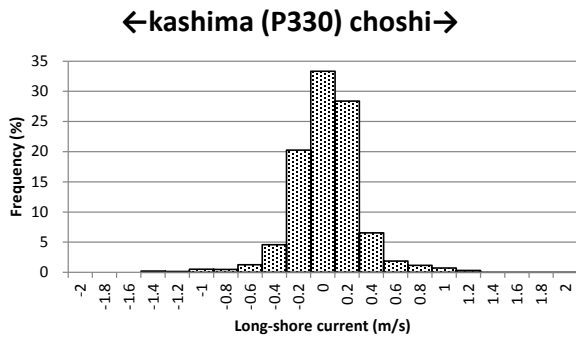


図-2.16 沿岸方向流速の頻度分布 (P330)

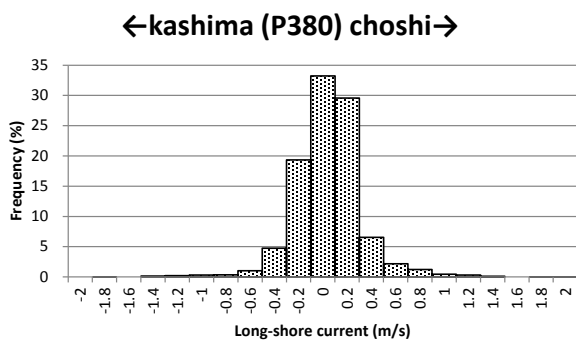


図-2.17 沿岸方向流速の頻度分布 (P380)

(5) 断面地形

海底断面地形は、観測栈橋先端 (P385) から後浜砂丘上 (P115) までの観測栈橋測線上で、観測栈橋上は目盛り付きレッドを用いて5m間隔で測深、砂浜上はレベルおよびスタッフを用いて5m間隔で測量したものである。1986年3月から2010年12月までの海底断面測量結果を用いて、期間中の平均断面、および、期間中で最も地盤高が高かった位置を結んだ堆積時包絡線、最も低かった位置を結んだ侵食時包絡線を図-2.18に示す。

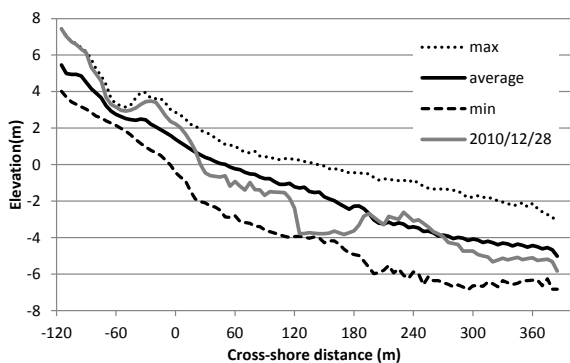


図-2.18 平均断面と堆積包絡線、侵食包絡線

2.3 試験に使用した防食工法

砕波帯の研究施設である観測栈橋の鋼管杭に各種の防

食工法を施工し、1984年 (昭和59年) ~2014年 (平成26年) まで、30年にわたり毎年現地試験を重ねている。

被覆防食工法の範囲としては主に±0mからコンクリート上部工下端部までの干満帯~飛沫帯に位置する環境である。電気防食工法の範囲は海水中、海底土中である。ここで調査を行った防食工法は表-2.13 (塗装工法以外) および表-2.14 (塗装工法) に示すとおりである。なお、表-2.14の塗装工法については、海上大気中に位置する、図-2.19に示す観測室下部の基礎杭 (K1~K12) に施工した。

(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 (亜鉛末塗料) 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、実績も多く信頼性が高い。

以下に代表的な塗装工法について述べる。

1) 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法

鋼管杭No.K1, K2, K3, K5に超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法を適用した。超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法は、コテ、ハケ、ローラーなどを用いて、1~2回塗り程度で1~5mmの塗膜厚を確保できる防食工法である。

2) ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法

鋼管杭No.K4, K8, K12にガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法を適用した。ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法は、超厚膜型エポキシ樹脂塗料にガラスフレークを含有させたものを塗布する工法である。遮水性が向上し、耐衝撃性を強化し損傷しにくくしている。

3) タールエポキシ樹脂塗装工法

鋼管杭No.K6, K7にタールエポキシ樹脂塗装工法を適用した。タールエポキシ樹脂塗装工法は、エポキシ樹脂をコールタールで変成することにより、優れた防食性能が得られ、経済的にも優れた防食塗料である。ただし、使用されているタール成分が特定化学物質であることから、昨今では使用が制限されている。

(2) 有機被覆工法

有機被覆工法は、有機高分子材料を鋼材表面に被覆し、鋼材面の腐食を抑えるものである。液体状あるいは半液体状の状態で行うものや、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。この工法の特徴は、複雑な形状の構造物に対しても施工可能なことである。素地調整は、表-2.15に示すようにISO-Sa2¹/₂である。以下に有機被覆工法のうち、ポリエチレン被覆工法と水中硬化形被覆工法について説明する。

表-2.13 観測棧橋鋼管杭に使用された防食工法および適用杭 No. (2014 年度現在)

防食工法	工 法 名	杭 No.
有機被覆工法	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	3,7,9,10,11,15,18,27,28
	改良ウレタン系カバーリング工法	21
	極厚マスチック防食工法	27,28
	ポリエチレン被覆工法	31,32,33,34,35
ペトロラタム被覆工法	PE 工法	3,13
	耐海水性ステンレスカバー工法	5
	一体成型防食工法 (A 法、B 法)	6,24
	FRP カバー工法	12,19,20,22 14
	APC 工法	16
	チタンカバー工法	23,26,30 25,29
無機被覆工法	ダクト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
	電着工法	9,10,11
	チタンカバーモルタル被覆工法	16
	GRC 補強カバー工法	17
	コンクリート被覆工法(CRUS 工法)	29
	金属溶射防食工法	棧橋上
電気防食工法	流電陽極方式	12,15,16,18,19,20,21,25,28,29 13,14,17,23,27,30,31 22,26
	マグネット式流電陽極方式	24

表-2.14 観測室下部鋼管杭に塗装した塗装工法名と杭 No. (2014 年度現在)

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

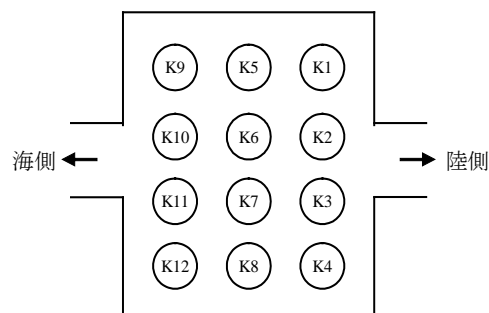


図-2.19 観測室下部塗装鋼管杭配置図

表-2.15 施工した素地調整グレード

施工法	素地グレード	ブラスト処理後の仕上り素地
ブラスト処理	ISO-Sa2 ^{1/2}	拡大鏡なしで、表面に見える油、グリース、泥土およびミルスケール、さび、塗膜、異物などがほとんどないこと。残存している汚れの全ての痕跡は、斑点あるいはすじ状の僅かな染みとしてのみ認められること。

1) 水中硬化形被覆工法

鋼管杭No.3, 7, 9, 10, 11, 15, 18, 27, 28に水中硬化形被覆工法を適用した。水中硬化形被覆工法は、海洋鋼構造物の海水中～飛沫帯の長期防食を目的とした防食工法であり、一般的にペイントタイプ、パテタイプの2種類がある。主剤樹脂として、いずれもエポキシ樹脂系が用いられている。複雑な形状の構造物にも施工が可能で、また補修材としても有効である。

2) ポリエチレン被覆工法

鋼管杭No.31, 32, 33, 34, 35にポリエチレン被覆工法を適用した。ポリエチレン被覆工法は、図-2.20に示すように工場で鋼材に被覆施工するもので、鋼材に被覆した製品として提供される。工場施工のため一貫した管理が行われており、品質が安定している。また、施工法および材料の特性から、耐久性、耐薬品性、耐海水性に優れ、カーボンブラックを配合することで耐候性を向上させている。図-2.21にポリエチレン被覆工法の構造を示す。

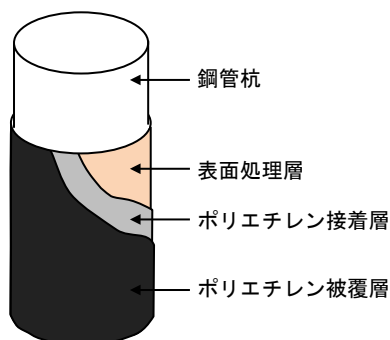


図-2.21 ポリエチレン被覆の構造

(3) ペトロラタム被覆工法

本工法の防食材として用いるペトロラタムは、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ワックスである。原料のペトロラタムに腐食抑制剤、充填剤等を加えたペーストおよびペトロラタムを含浸させたテープを、直接鋼材面に一定の厚みで被覆し、その防食層の外周に保護カバーを取付け

る。防食の原理は同じであるが、保護カバーにはいくつかの種類があり、一般に樹脂系や耐食金属系のカバーが多く用いられている。素地調整は無機被覆工法と同様に、3種ケレン (ISO-St2) 程度である。

以下に、本棧橋に適用した代表的なものについて述べる。

1) FRPカバー工法

鋼管杭No.12, 14, 19, 20, 22にFRPカバー工法を適用した。FRPカバー工法は、最も多くの施工実績を有する工法である。軽量で取り扱い易く、施工性や美装性に優れている。

2) PE工法

鋼管杭No.3, 13にPE工法を適用した。PE工法はポリエチレンの特性を活かし、平板PEカバーを鋼管杭に巻付けて、カバー端部を重ね合わせ、その接合部を熱融着させカバーを固定装着させる工法である。フランジ部がなく波の圧力や漂流物による影響が少ない。

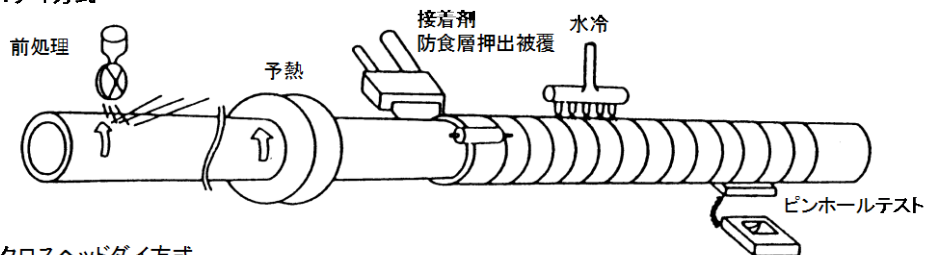
3) 耐海水性ステンレスカバー工法

鋼管杭No.5に耐海水性ステンレスカバー工法を適用した。耐海水性ステンレスカバー工法は、耐食性に優れたステンレスを保護カバーとして使用しており、耐衝撃性にも優れた工法である。

4) チタンカバー工法

鋼管杭No.23, 25, 26, 29, 30にチタンカバー工法を適用した。チタンカバー工法は、耐食性に優れたチタンを保護カバーとして使用しており、耐衝撃性にも優れた工法である。

●Tダイ方式



●クロスヘッドダイ方式

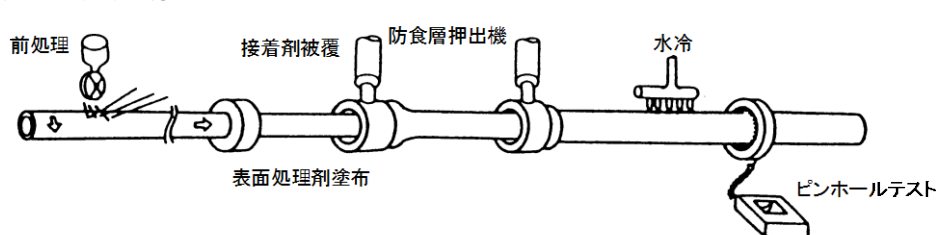


図-2.20 ポリエチレン被覆鋼管杭の製造の様子

(4) 無機被覆工法

無機被覆工法は、セメントモルタルや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。無機被覆工法の素地調整は、塗装・有機被覆工法と異なり、鋼材の表面のさびや汚れを洗浄するだけの比較的簡単な処理方法で、素地調整のグレードは3種ケレン（ISO-St2）程度で良いとされており、一般的に、高圧ウォータージェット、電動工具、手工具などを用いて行われている。

以下、本検討で対象としているコンクリート被覆工法について、具体的に述べる。

1) コンクリート被覆工法

鋼管杭No.29にコンクリート被覆工法を適用した。コンクリート被覆工法は、セメント自身が持つ強いアルカリ性によりセメント内部の鋼材表面に形成される緻密な不動態被膜で、鋼材面を腐食作用から保護することを特徴とした防食工法である。コンクリートの中性化を防止し、長期耐久性を確保するため、かぶり厚さとして70mm以上が必要である。

No.29に適用されているコンクリート被覆工法は、鋼管杭と防食層の鉄筋コンクリートを水中スタッド溶接で強固に一体化させた点に特徴があり、防食と補強を兼ねた工法である。

(5) 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。この防食方法は、海水に浸漬する鋼構造物を始め、パイプライン、熱交換器、船舶、基礎鋼材などの防食法として広く適用されている。

電気防食工法は、流電陽極方式と外部電源方式の2種類に大別される。前者の流電陽極方式では、海水中および海底土中部にある被防食体（鋼管杭、鋼矢板等）よりも低い電位の金属（鋼に対してはアルミニウムや亜鉛等）が陽極として用いられる。港湾鋼構造物の場合は、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。現在この方式が主流である。後者の外部電源方式は、直流電源装置のプラス端子からリード線で海水中に不溶性電極を設置し、鋼材には直流電源装置からリード線でマイナス端子を接続して電気回路を作り、鋼材に強制的に防食電流を流す方式である。本資料では表-2.16に示す流電陽極方式を対象とした。

表-2.16 試験に使用された電気防食工法および適用杭

杭 No.	取付位置	工法名	仕様
22 23 26 30	-2.0m	流電陽極方式	陽極材料：アルミニウム合金 数量：1個 重量：31.9kg以上 標準発生電流：3.0A 寿命：約5年

注) 1993年以降に取り付けた陽極の寿命は10年以上である。

2.4 試験実施概要

各種防食工法の長期間にわたる耐久性および防食効果を検証する目的で、1984年から試験を開始した。被覆防食工法では、有機被覆工法、ペトロラタム被覆工法、無機被覆工法、塗装等の多岐にわたる防食工法の暴露試験を行い、その防食効果と耐久性を検証した。また、電気防食工法の試験では、電気防食を適用した鋼管杭の電位と、陽極の発生電流の挙動を明らかにするなど、設計手法の基礎データを得るための試験を行った（各工法の詳細は、各章で説明する）。

(1) 定期調査

1年に1回の定期調査を実施した。被覆防食工法については外観調査を行った。表裏から2面、写真撮影と変状スケッチを実施。電気防食工法については電位を測定し、防食性能を確認した。

(2) 詳細調査

1年に1回の外観調査とは別に、5～10年に1回程度の頻度で詳細調査を実施した。この際、絶縁抵抗、付着力、塩化物イオンの浸透深さ、機械的性質、減耗量等を測定した。

(3) 維持、補修の実施

被覆防食工法について、劣化箇所、サンプル採取箇所については補修を実施した。また、電気防食工法については陽極の更新を行った。

2.5 20年の調査成果の概要

暴露20年目の調査報告では、20年間にわたり、防食状態を維持することができる工法があることを述べた²⁾。以下に調査成果の概要を述べる。

(1) 塗装工法

a) 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法

- ・絶縁抵抗，付着力および塩化物イオンの浸透深さを測定した結果，防食性能上の問題は認められなかった。
- ・被覆材の表面には軽度のチョーキングが認められたが鋼材表面の素地には腐食は発生しておらず，良好な防食状態であった。

(2) 有機被覆工法

a) ポリエチレン被覆工法

- ・絶縁抵抗，膜厚，ピール強度，引張強度，体積固有抵抗および吸水率の測定の結果，防食性能上の問題は認められなかった。
- ・被覆材の外観に異状はなく，鋼材表面の素地にも腐食は発生しておらず，良好な防食状態であった。

b) 水中硬化形被覆工法

- ・絶縁抵抗，付着力および塩化物イオンの浸透深さの測定の結果，防食性能上の問題は認められなかった。
- ・被覆材の表面に中程度のチョーキングが認められたが，鋼材表面の素地には腐食は発生しておらず，良好な防食状態であった。

c) 極厚マスティック防食工法

- ・絶縁抵抗の測定の結果，防食性能上の問題は認められなかった。
- ・付着力の測定の結果，一般的な施工事例よりも付着力が小さかった。これは不十分な素地調整が原因と考えられる。
- ・被覆材の打ち継ぎ部に劣化が認められた以外には，被覆材の外観に異状は認められず，鋼材表面の素地には腐食は発生していないことから，良好な防食状態であったと判断される。

(3) 無機被覆工法

a) 電着工法

- ・電着物の物理的強度の指標となる組成比率は，21年間の試験期間中ほとんど変化せず安定していた。
- ・電着物の年間平均磨耗量は約0.21mmと小さく，経年的に緻密になり硬くなっていく時効硬化も確認されたことから，電着物は耐久性に優れた無機系被覆材料であるといえる。

b) コンクリート被覆工法

- ・コンクリートの強度試験の結果，配合強度を超える圧縮強度を21年経過後も有している。
- ・コンクリートの中性化の進行は，コンクリート標準

示方書による予測式に近いが，または下回る結果が得られた。

- ・本試験に用いた水中不分離性コンクリートを適正に施工した場合，鉄筋のかぶり厚8cmの位置で塩化物イオン量の腐食発生限界値を越えるのは，およそ26年後以降であると推定される。
- ・鋼材表面の素地および鉄筋には，腐食は認められず，良好な防食状態であった。

(4) ペトロラタム被覆工法

a) チタンカバー工法

- ・溶接部を含め，チタンカバー材に異状は認められなかった。一部，チタンカバー表面に変色が認められたが，これは仮設金物などの流れ錆によるものと考えられる。
- ・チタンカバー材の強度試験の結果，引張力，0.2%耐力および破断伸び率は規格値を満たしており，20年間の暴露後も強度は維持されていた。

b) ポリエチレン樹脂カバー工法

- ・ポリエチレン樹脂カバー材に異状は認められず，鋼材表面の素地にも腐食は発生していないことから，良好な防食状態が維持されていたと判断される。
- ・ペトロラタムテープの油分残存率試験の結果，海水中付近で他の部位よりも低下している傾向が認められた。
- ・ポリエチレン樹脂カバーの強度試験の結果，引張強度は規格値を超えていたが，曲げ強度は規格値を若干下回っていた。これは経年劣化によるものと考えられる。
- ・鋼管杭の現有肉厚は，設計肉厚と同等であり，十分な防食効果が得られていると判断される。

c) FRP樹脂カバー工法

- ・FRP樹脂カバー材に異状は認められなかった。
- ・ペトロラタムテープの油分残存率は，18年間で最大15%低下した。
- ・FRP樹脂カバーの強度試験の結果，曲げ強度は規格値と同等以上であったが，引張強度は低下し，規格値以下になった。
- ・鋼材表面の素地に腐食は認められず，試験片による防食試験結果でも防食率はほぼ100%であることから，良好な防食状態であったと判断される。

(5) 電気防食工法

a) 鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移

- ・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った。

- ・陽極の発生電流は時間とともに低下し、初期の50%以下にまで低減した。
 - ・高波浪などの厳しい腐食環境下においても、流電陽極方式による電気防食は十分に機能する。
- b) 干満帯への防食効果
- ・高波浪環境下では干満帯にも波がかかり、没水している時間が長いために、電気防食の効果が及ぶ。
- c) 定電位法による電気防食試験
- ・定電位試験の結果、-800~-900mVの設定電位の範囲では、より卑値に設定した場合に電流密度の低減が早い時期に始まる。陽極寿命を延ばすためには、設定電位をより卑値にすることが望ましい。
- d) サンドエロージョンの防止
- ・電気防食を施した試験片と不通電試験片の比較をした結果、電気防食を施した場合の防食効果が顕著であり、サンドエロージョンに対して電気防食工法が有効であることが明らかとなった。

鋼管杭No.K4, K8, K12にガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法を適用した。ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法は、超厚膜型エポキシ樹脂塗料にガラスフレークを含有させたものを塗布する工法である。遮水性が向上し、耐衝撃性を強化し損傷しにくくしている。

2.6 20年調査結果の活用事例

波崎栈橋での調査結果が、マニュアル類に活用された事例を以下に示す。

(1) 代表的な被覆防食法の実績の提示³⁾

一般に、被覆防食工法の信頼性の評価には、その実績が参考となる場合が多い。そのため、長期にわたる暴露試験結果は参考資料として有用となる。

表-2.17に、飛沫帯における代表的な被覆防食工法の暴露試験結果³⁾を示す。波崎栈橋での20年までの調査結果が含まれている。

表-2.17 飛沫帯における代表的な被覆防食法の暴露試験結果³⁾

防食系	防食法	鋼管杭の実海域暴露試験により防食効果が確認された年数			
		0年	10年	20年	30年
塗装	厚膜有機ジンク+エポキシ+フッ素樹脂 (無機ジンク+タールエポキシ)			●	
有機被覆	ポリエチレン被覆	→	→	→	
		→	→	→	
	ウレタンエラストマー被覆	→	→	→	→
		→	→	→	→
超厚膜形被覆	→	→	→	→	
	→	→	→	→	
水中硬化形被覆	→	→	→		
	→	→	→		
ペトロラタム被覆	ペトロラタム+樹脂カバー	→	→	→	
	ペトロラタム+耐食性金属カバー	→	→	→	
モルタル被覆	鉄筋コンクリート被覆(保護カバー有無)	→	→	→	
	モルタル被覆+保護カバー	→	●	→	
耐食性被覆	耐海水性ステンレス被覆	→	→	→	→

注1 波崎 (実線) 福山 (点線) 千葉・阿字ヶ浦 (点線)
 駿河湾 (点線) 宮古島 (点線) 三河 (点線)

注2 → 試験が継続されている系 ● 試験が中止された系

(2) 代表的な期待耐用年数⁴⁾の設定の際の根拠資料として活用

1. でも述べたように、被覆防食工法の性能評価方法が確立されていない現状において、被覆防食工法の耐用年数を基に、維持管理計画の作成、ライフサイクルコストの算定が行われることが多い。

表-2.18に、代表的な被覆防食の期待耐用年数を示す。なお、ここでの期待耐用年数とは、過去の実績に基づき、標準的な環境や施工条件を想定した目安である。この期待耐用年数の設定の際の根拠資料として、波崎栈橋での20年までの調査結果も参考とされている。

参考文献

- 1) 栗山善昭・伊藤啓勝：波崎海洋研究施設で観測された沿岸流の卓越方向の岸沖分布，海岸工学論文集，第51巻，pp.146-150，2004.
- 2) 宮田義一・阿部正美・濱田秀則・清水一夫・中野啓眞・芥川博昭：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.
- 3) （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），p.64，2009.
- 4) 文献3，p.59，2009.

表-2.18 代表的な被覆防食の期待耐用年数（文献4に加筆修正）

被覆防食法		種類	期待耐用年数*
工場被覆	塗装	海洋厚膜エポキシ塗装系	20年程度
		海洋エポキシガラスフレーク塗装系	
	重防食被覆	ポリエチレン被覆	30年程度
		ウレタンエラストマー被覆	
	超厚膜形被覆	超厚膜形エポキシ樹脂系被覆	30年程度
		超厚膜形ポリウレタン樹脂系被覆	
耐食性金属被覆	耐海水性ステンレス鋼被覆	50年程度	
	薄板チタンクラッド鋼被覆		
現地被覆	水中硬化形被覆	ペイントタイプ	20年程度
		パテタイプ	
		湿潤面タイプ	
	ペトロラタム被覆	樹脂性保護カバー方式	30年程度
		耐食性金属保護カバー方式	
	モルタル被覆	鉄筋コンクリート被覆	30年程度
モルタル被覆 + 保護カバー			

*主として鋼管杭を対象

3. 塗装工法

3.1 はじめに

鋼管杭における塗装工法は、鋼材表面の下地にジンクリッチプライマー（亜鉛末含有塗料）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、実績も多く信頼性が高い。波崎に適用されている代表的なものとして、超厚膜型エポキシ樹脂塗料、ガラスフレークエポキシ樹脂塗料、タールエポキシ樹脂塗料などがある。

波崎観測棧橋の陸上施設部の鋼管杭（K1～K12）については、各種塗装工法が1985年に適用され、2015年度で30年が経過した（詳細は付録Cを参照）。その大半が30年前頃に確立された超厚膜エポキシ樹脂塗料や、そこへガラスフレークを含有させた塗料を中心とした環境遮断性を重視した防食工法である。20年経過時には、K2およびK3杭を中心に詳細調査が実施され、表面に軽度のチョーキングが見られたものの絶縁抵抗および付着力からは高い防食性を維持していると結論づけられている¹⁾。

塗装工法については、実績は多いものの、実環境での長期耐久性の実態、劣化メカニズムおよび防食性能の評価手法・劣化予測手法については、未だ確立されていないのが現状である。

今回、30年経過時の調査（調査日時点においては29.5年経過）にあたり、耐久性に関する考察と、今後の課題を抽出するために、ほぼ全ての陸上杭について詳細な調査・解析をおこなった。

3.2 調査内容

2015年6月16～17日に現地調査を行った。表-3.1に概要を示すとともに以下順に述べる。

(1) 外観観察

各杭について海側および陸側より写真撮影、およびスケッチをおこなった。

(2) 膜厚測定

各杭の海側、陸側について、上部工下端より1m、2m、3mの部位について、各点n=5にて膜厚を計測し、その平均値を残存膜厚とした。計測には、サンコウ電子研究所製電磁誘導式膜厚計SM-1000を用いた。

(3) 付着力測定

各杭の海側、陸側について、外観上腐食の見られない一般部、腐食部近傍および過去補修部近傍などを選択し、付着力を測定した。計測にはエルコメーター社製のアドヒージョンテスターを用い、付着強度とはく離箇所（ASTM D4541-02）により評価を行った。

(4) 鋼材素地観察

各杭の海側、陸側について、一般部から縦×横＝10×10cmの塗膜をスクレーパーにより強制剥離し、鋼材面の状態を観察した。なお、剥離した塗膜は後述する各種分析試験に供した。

(5) 電気化学インピーダンス（EIS）測定

各杭の海側、陸側について、外観上腐食の見られない一般部、腐食部近傍および過去補修部近傍などを適切に選択し、2極式電気化学インピーダンス（EIS）を計測した。前記計測部を十分に上水で濡らした後、支持電解質として0.1%硫酸ナトリウムを添加した5%カルボキシメチルセルロースペーストを10×10cmに渡り十分に塗布し、その上から10×10cmのアルミニウム箔を貼り付け、これを対極とした。鋼材素地観察部を金属光沢が現れるまで研磨し、そこを作用極側導通部とした。計測周波数は1～10⁶Hzとし、振幅は500mVとした。計測器は関西ペイント社製のワイドバンド・ポータブル・インピーダンス計測器（WP-EIS：写真-3.1）を用いた。

(6) 塗膜分析

表面および断面方向より走査型電子顕微鏡観察（SEM観察）、元素分布（塩素のみ）の解析を実施した。また赤外吸収スペクトルの解析（IR分析）を実施した。

表-3.1 各塗装工法概要と調査項目の一覧

杭No.	K2	K3	K4	K8	K12	K6	K7	K10	K11	K9
内容	超厚膜エポキシ		ガラスフレーク(GF)			タールエポキシ		*1	*2	*3
上塗	エポキシ 1000 μm ×2回	エポキシ 2000 μm ×1回	GFエポキシ 300 μm ×3回	GFエポキシ 300 μm ×3回	GFエポキシ 500 μm ×2回	タールエポキシ 150 μm ×3回	タールエポキシ 150 μm ×3回	ふっ素 GFポリエステル 350 μm ×2回	エポキシ 300 μm ×3回	ふっ素 エポキシ
中塗										
下塗										
ジンクリッチペイント(亜鉛末塗料)膜厚	20	20	15	15	なし	20	20	75	なし	75
設定トータル膜厚(μm)	2020	2020	915	915	1000	470	470	815	900	250
経過年数(年)	29	29	29	29	29	29	29	29	29	8
定期調査	外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	-
	写真撮影	○	○	○	○	○	○	○	○	-
	膜厚測定	○	○	○	○	○	-	○	○	-
詳細調査	付着力測定	○	○	○	○	○	-	○	○	-
	鋼材素地観察	○	○	○	○	○	-	○	○	-
	電気化学インピーダンス	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	分析・塩素イオン透過	○	○	○	○	○	-	-	-	-

*1: ガラスフレークポリエステル/ふっ素樹脂上塗り
 *2: 湿潤面用エポキシ樹脂
 *3: 橋梁用C-5塗装系(電気化学インピーダンスの比較として)



写真-3.1 WP-EIS 計測装置外観

3.3 調査結果

3.3.1 外観

今回調査の概観観察結果について、写真は付録Dを参照されたい。

K2, K3 (超厚膜型エポキシ樹脂塗料塗装工法) においては、約30年間の調査期間中に度重なる付着力測定や塗膜剥離を実施しており、多数の補修跡が存在している。錆の発生状況としては著しく少ない。しかし、例としてK3杭一般部の拡大写真(写真-3.2)に示したように、表面には多数のクラック(ひびに見える部分)やポイド(小さな黒い点に見える部分)が発生していた。

K4, K8, K12 (ガラスフレックエポキシ樹脂塗料塗装工法) においては、塗料材料の成分の詳細が異なるために、同様のカテゴリであっても、外観の状況が異なっていた。まず、K4, K8は主に過去調査における補修部跡およびその近傍において、錆の発生が認められた。しかし拡大観察により認識されるような塗膜表面のクラックやポイドはK2, K3杭に比較して少なかった。一方、K12は上部工との境界部より2m下方の広範囲にわたって著しい錆の発生が認められた。錆の無い部位について塗膜を拡大観察すると、K2, K3同様のポイドやクラックが多数確認された。

K6, K7 (タールエポキシ樹脂塗装工法) においては、上部工との際部および地際部から比較的広範囲に渡る錆の発生が認められた。一般部における塗膜表面は、クラックやポイドの発生が見られず、良好な状態を保っていた。

K10 (ガラスフレックポリエステル樹脂/ふっ素樹脂塗料塗装工法) においては、上部工との境界部および過去調査における補修部とその近傍からの錆の発生が認められた。塗膜表面のクラックやポイドの発生は見られず、光沢のある状態であり、一般部における塗膜状態は良好であるとともに、塗膜の劣化についても非常に抑制され

た状態にあった。上塗りに高耐候性を有するふっ素樹脂塗料を適用しているためと判断できる。

K11 (湿潤面用エポキシ樹脂塗料塗装工法) においては、全体に著しい錆の発生が認められた。錆のない部位の塗膜については、拡大観察により表面にポイド・クラックが発生していた。

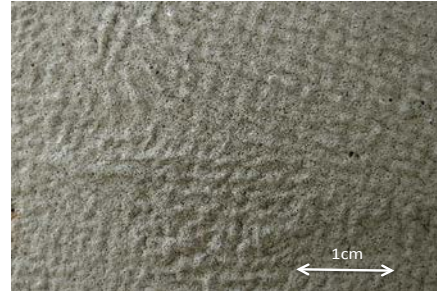


写真-3.2 K3 杭一般部の表面拡大写真

3.3.2 膜厚

表-3.2に測定結果の一覧を示す。計測部位や計測器を完全に一致させた初期膜厚データが無いため、少々の膜厚増減についての議論は困難である。そこで、錆の発生が少なくかつ同一計測器による膜厚データが存在するK2, K3, K4, K8について最近5年間の平均減耗量を比較したものを図-3.1に示す。ばらつきの大きな結果であり確定は難しいものの、K8が最も減耗速度が遅く、次いでK4≒K3, K2の順となった。この結果より、ガラスフレック(K8のみで使用)は塗膜の減耗を抑制する可能性がある。

一方、外観上の劣化が進んでいたK10, K11, K12については、平均に対する標準偏差の大きさからも明らかのように、膜厚に大きなばらつきが見られ、全体の平均値としては初期の設定膜厚よりも著しく厚い結果となった。これらの杭では、恐らく外観上一般部と見て取れる塗膜下においても錆が発生しており、塗膜が鋼材より浮き上がっているものと推定される。このような場合、膜厚のばらつきの程度が塗膜下の変状を示している可能性がある。

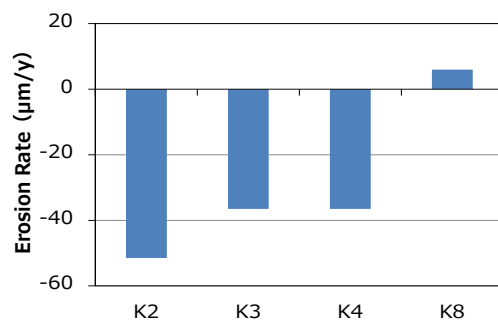


図-3.1 平成 23~27 年度調査における膜厚減少の比較

3.3.3 付着力

結果の一覧を表-3.3に示す。過去の補修部近傍、錆発生部近傍の結果は灰色で網掛けした。このように整理してみると、各工法に共通し、過去調査補修部近傍や錆発生部近傍は、一般部に比べて付着力が劣る傾向にあった。

剥離部位について述べる。K2, K3杭については、付着力の劣る部位は主に亜鉛末塗料の塗膜層における凝集破壊であり、それ以外はエポキシ樹脂塗膜層内における凝集破壊となった。K4, K8についてはいずれもガラスフレークエポキシ樹脂塗膜層内における凝集破壊であった。杭全体に錆発生が著しかったK12については、付着力の劣っている部位は塗膜下の錆層における凝集破壊であり、それ以外については鋼材素地に達する深い層での凝集破壊であった。K10については、K2, K3杭と同様の傾向にあった。K11は、全体に付着力が他杭に比較して劣り、いずれも亜鉛末塗料の塗膜層あるいはその下の錆層における凝集破壊となった。

過去の補修部近傍において付着力が劣る傾向は、何らかの腐食因子（水分など）が長い時間をかけて、補修塗料塗膜と初期塗膜との境界部より浸透することが原因と推察される。

3.3.4 鋼材素地表面状態

観察結果の概要について表-3.4に示す。外観観察により錆の発生が認められないK2およびK3、補修近傍部のみ錆発生が認められたK4およびK8の一般部については、鋼材素地表面に明らかな錆の発生は認められなかった。全体に錆発生の著しかったK11およびK12については、鋼材表面に部分的に錆が見られた。つまりK11およびK12については外観上錆のない一般部についても塗膜下には錆が発生していたこととなる。K10については、海側の塗膜剥離部に錆の発生が認められた。おそらくこの部位は過

去補修部近傍（錆発生部）に近かったことから、そこから塗膜下における腐食が進行してきたものと思われる。

3.3.5 電気化学インピーダンス (EIS) 特性

20年経過時の調査までは絶縁抵抗によって塗膜の環境遮断性能を評価したが、年数の経過により抵抗値が上昇するといった通常あり得ない結果となっていた¹⁾。当時は計測の難しさが原因の一つと結論づけられた。

今回の30年経過時の調査においては、当時より更に塗膜の劣化が進んでおり、例えば塗膜内部における架橋の切断や空隙発生に起因した吸水による静電容量の増大や、塗膜抵抗の低下が予測された。

一方、近年においては計測器類の測定感度などの上昇が著しい。そこで小型で測定感度が高く1~10⁵Hz域という広範囲の周波数にて計測できるワイドバンド型ポータブルインピーダンス計測器を別途開発し、現地調査に適用することとした。

同一塗料を塗装した塗装鋼材に対する広周波数域の測定より得られる周波数スペクトル図 (bode線図) の概念を図-3.2に示す。塗装膜厚と照合することで、得られたチャートから直接的に塗膜の劣化程度とその性質を読み取ることが可能となった。

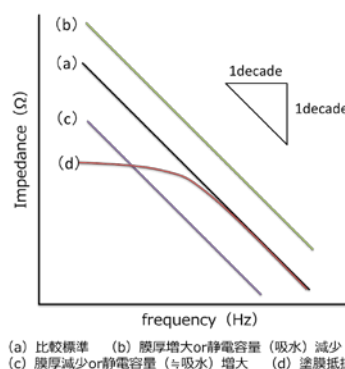


図-3.2 塗装鋼材の電気化学インピーダンスチャート

表-3.4 塗膜剥離部における鋼材素地表面の観察結果

	K2	K3	K4	K8	K12	K10	K11
海側	 錆発生なし	 錆発生なし	 錆発生なし	 錆発生なし	 部分的に錆発生	 錆発生	 錆発生
陸側	 錆発生なし	 錆発生なし	 錆発生なし	 錆発生なし	 部分的に錆発生	 錆発生なし	 部分的に錆発生

電気化学インピーダンス法を現地で適用するに当たっては、塗膜表面を伝う漏れ電流による影響を可能な限り抑制することが計測値の信頼性向上には欠かせない。そこで、今回の計測においては、導通部と計測部の距離を可能な限り離し、かつ導通部において鋼材と接触する導線が直接的に塗膜へ接触しないように工夫を凝らした。

以下、錆発生が少なかった杭の結果と錆発生が多く認められた杭の結果について述べる。

(1) 錆発生が少なかった杭の結果

まず、錆発生が少なかった超厚膜エポキシ樹脂系のK2, K3, ガラスフレークエポキシ樹脂系のK4, K8について得られたBode線図を図-3.3に、錆発生部近傍など一部の計測部位について写真-3.3に示す(口囲み部位を計測)。比較対象は、後述する「錆発生が著しいK11の一般部」および「劣化が進んでいないと予想される塗装後経過8年のK9(橋梁用、ふっ素上塗りC-5塗装系)の一般部」とした。また各杭において最も高いインピーダンス特性を示すものが、過去補修部や錆発生部より最も離れた一般部に相当する。

各杭における一般部(補修部より充分に離れた部位；K2-1, K3-1, K4-1, K8-1, K8-2, K8-3。-1,-2,-3は通し番号)のインピーダンス特性について比較すると、K2-1が最も良好で、次いでK4-1, K8-1, K3-1の順であった。K2-1, K4-1, K8-1～3は周波数変化に対して抵抗(Z)の変化が著しく小さい領域(このときのZの値は塗膜抵抗を示す)が見られず、明らかに現状においても防食状態にあると判断される。しかし、膜厚が2,020 μm と厚いK2において、合計膜厚250 μm と比較的薄いK9(C-5塗装系)とはほぼインピーダンスカーブが近いことから、静電容量は著しく増大しているといえた。従って、K2においては、C-5塗装系と比較すると、厚膜塗膜としての膜厚効果は既に失われつつあると考えられた。また、他杭(K3, K4, K8)についても、いずれもK9より劣り、厚膜塗膜としての防食寿命を終えつつあることがわかる。

その他の一般部以外の計測部のインピーダンスカーブは、過去補修部の近傍や錆発生部に近い部位のものであり、一般部に比較していずれも低下していた。この点については、鋼材表面の錆発生状況および付着力の低下現象と併せて考察する必要がある。

(2) 錆発生が多く認められた杭の結果

錆発生が多く認められたK6, K7, K10, K11, K12について、得られたBode線図を図-3.4に、錆発生部近傍など一部の計測部位について写真-3.4に示す(計測部位には

アルミ箔が貼り付けてある)。比較対象は、後述する「錆発生が著しいK11一般部」および「劣化が進んでいないと予想される塗装後経過8年のK9(C-5塗装系)の一般部」とした。また各杭において最も高いインピーダンス特性を示すものが、過去補修部や錆発生部よりもっとも離れた一般部に相当する。

各杭における上記した一般部(K6-1, K7-3, K10-4, K11-2, K12-2)について比較すると、K10-4およびK7-3が比較的良好であったが、C-5に比較すればいずれも塗膜抵抗は低下していることが明らかであった。全体に錆発生が著しいK12のインピーダンスは、他に比べて著しく低い結果となっており、塗膜下においても錆が発生しているものと判断できる。しかし、K11における塗膜無しの錆部と比較すると、まだ塗膜は幾分か抵抗を持っていた。恐らく、残存する劣化塗膜が、水分や腐食因子の浸透に対して拡散抵抗としての役割をまだ果たしていたものと思われる。

各杭における一般部以外のその他のインピーダンスカーブは、過去補修部あるいは錆発生部に近いものであり、一般部に比較していずれも低下していた。ただし、K10については他杭に比較してその低下が穏やかであった。これは3.4.3および3.4.4にて別途考察する。

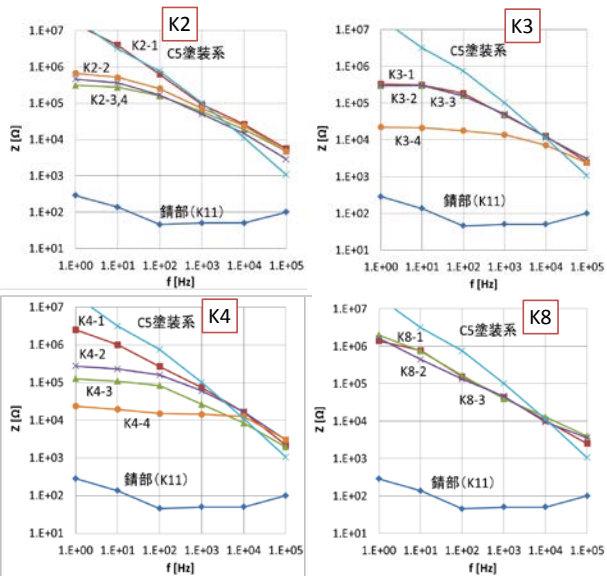


図-3.3 錆発生が少ない杭に関する電気化学インピーダンス測定結果

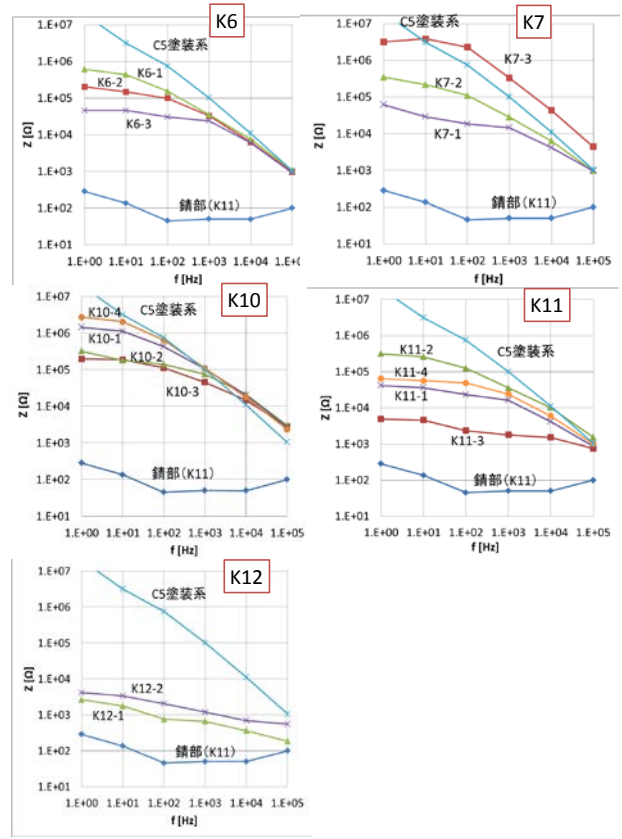


図-3.4 錆発生の多い杭に関するインピーダンス測定結果

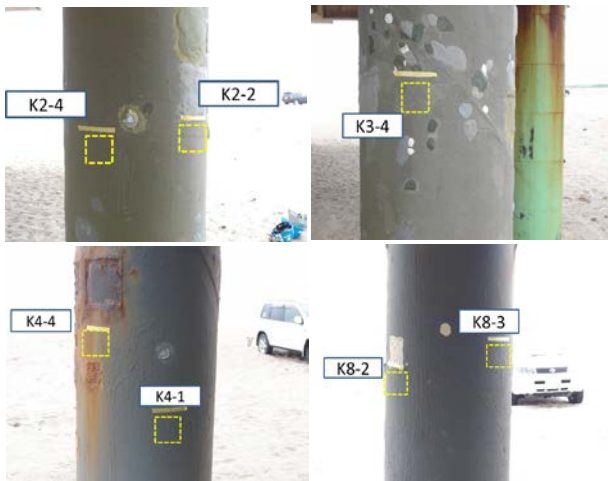


写真-3.3 錆発生が少ない杭のインピーダンス計測部位 (抜粋)



写真-3.4 錆発生の多い杭についての過去補修部、錆発生部近傍における計測部例

3.3.6 塗膜分析

K2, K3, K4, K8, K12の陸側, 海側からそれぞれ剥離した塗膜の断面SEM観察写真の一覧を表-3.5に示す. 各塗膜について低倍率(左側)と高倍率(右側)を載せた. まず超厚膜エポキシ樹脂塗装杭K2, K3について比較する. これらはいずれも表層側に劣化した樹脂層(表層の白色部)と思われるものが認められた. また塗膜内部に球状の空隙が多数認められた. 拡大写真からもわかるように, 非常に小さな空隙が多数発生していた. これらは施工時から存在していた気泡と考えられる.

塩素の浸透深さに関しては, 20年の調査時における分析法と同様の方法(EPMAによる線分析)を用いた結果を

図-3.5に示す. いずれも表層より50~80 μ m程度の深さの範囲(表-3.5の断面写真において白色に見える層の厚みと同程度の範囲)において高く検出された. 一方, それより深い領域についても, ノイズレベルではあるが微量の塩素の存在が示唆された. 特に図-3.5における左下グラフを見ると, 表層から0.12mmの深さ付近の領域の値が著しく小さくノイズが全く見られない. この箇所は, 塗料中の顔料部での結果であり, 樹脂の存在しない部分には塩素が存在していないことを意味している. 言い換えると, 塗膜の樹脂部全体にわたり, 微量ではあるが塩素が存在(浸透)しているものと判断できる.

また, K2, K3よりも著しく膜厚の厚いエポキシ樹脂(水

表-3.5 剥離塗膜の断面観察(抜粋)

	陸側		海側	
	低倍率	高倍率	低倍率	高倍率
K2				
K3				
K4				
K8				
K12				

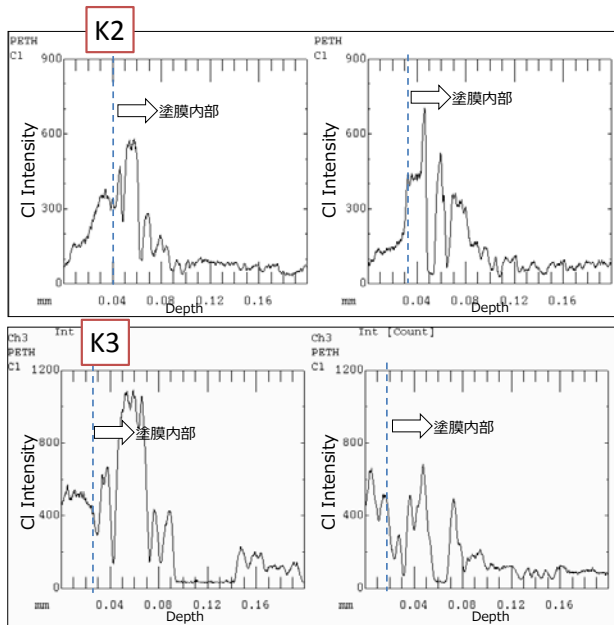


図-3.5 K2およびK3 海側より剥離した塗膜の深さ方向のCl分布

中硬化形被覆)に対して、EPMA分析を行った4.の図-4.5においても、エポキシ樹脂層全体にわたり塩素の浸透が確認されていることも、今回の結果の裏付けとなる。さらには、図-3.3に示したインピーダンス特性より、静電容量が増大しており、塗膜内部に水分等が浸透しやすい状態となっていると判断されたこととも矛盾しない。

次いでガラスフレーク系のK4, K8, K12を比較する。いずれも塗膜内部に球状の空隙が認められた。K2, K3に比較してそのサイズは大きく、またK2, K3に認められたような非常に細かな空隙は明らかに少なかった。これらの大きな空隙は施工時から存在した気泡と思われる。なお、内部には巨大なガラスフレーク(図中で細い棒状に見えるもの)が分布していた。

K12については他の2者に比較して細かな不定形のフィラーが多いものの、ガラスフレークも一様に分布していた。このことより、K12における著しい錆の発生は、ガラスフレーク塗膜構造の違い以外にも原因があると考えられる。塩素の浸透深さに関してはいずれもばらつきが大きく、表層より50~80 μm 程度であり、鋼材素地側に至っては検出感度以下であった。

なお、いずれの試料についてもIR分析を試みたが、表面付着成分等のばらつきにより、考察に活用できるような再現性の高い解析結果は得られなかった。

3.4 考察

以上の結果を基に、塗膜の耐久性およびインピーダンス特性に関する考察、そして塗膜の劣化メカニズムに基

づく塗装工法の維持管理の高度化に関する考察を行う。

3.4.1 塗膜の耐久性に関する考察

(1) 亜鉛末塗料の効果

錆発生状況の著しかったK11およびK12(亜鉛末塗料は未使用)は、膜厚測定値の信頼性は低いものの、断面写真を見る限り、十分に膜厚は確保されており、かつガラスフレークによる腐食因子の迂回効果が期待できる形態であった。

これに対して防食状態として比較的良好であったK4, K8は、亜鉛末塗料を15 μm 適用したものである。また、K11およびK12以外の杭にはいずれも同様、または厚塗り型の亜鉛末塗料を適用していた。

以上のことから、厳しい腐食環境における30年にわたる長期の防食性は、超厚膜又はガラスフレークによる腐食因子の迂回効果といったバリアー効果のみでは達成困難であり、亜鉛末塗料による犠牲防食効果、あるいは亜鉛末塗料との接触により鋼材の電位を低く保つ作用が必要だったと思われる。

(2) バリアー性の影響

合計膜厚462 μm のK6およびK7に対して、亜鉛末塗料膜厚が同様で、合計膜厚が2,020 μm と厚いK2, K3を比較すると、後者の錆発生が明らかに抑制されていたことから、長期の防食性に対して、少なくともインピーダンス特性が低下してくるまでの期間においては、厚膜化の効果はあったものと考えられる。

さらにK2, K3に対しK4, K8は、膜厚が薄いかわりにガラスフレークを適用しており、錆発生のない一般部におけるインピーダンスは十分に高い値であった。従って亜鉛末塗料が適用された系においては、ガラスフレークが腐食因子の浸透に対する迂回効果を発揮したものと考えられる。ガラスフレークエポキシでありながら錆発生が著しかったK12との比較を改めて考えると、『亜鉛末塗料適用により鋼材の電位を低く保つこと』に対する『エポキシ樹脂塗膜のバリアー性向上』の寄与は、後者の方がやや小さいのではないかと考えられる。

一方で、特に錆発生が少なかったK2, K3の現在および今後のバリアー性について考える。これらの現在のインピーダンス特性は、現存膜厚に対して通常考えられるインピーダンス特性に対して静電容量が非常に大きくなっていると判断された(図-3.3)。K2, K3では、断面観察(表-3.5)から非常に細かい空隙が多数確認されており、この空隙に水分が浸透しやすい状況にあると考えられ、結果として静電容量が大きくなっていると考えられる。主にバリアー性を発揮する塗膜部に劣化因子が浸透しや

すくなっており、今後は塗膜下の亜鉛末塗料の塗膜層の劣化が加速されることが十分に予想されるため、今後はより密な頻度で定期調査を実施する必要がある。

(3) 塗膜の耐候性の影響

一般部としてのインピーダンス特性を基に、塗膜の耐候性の影響について、各杭の塗装膜厚の違いを加味して考察する。

上塗りにふっ素塗料を適用したK10では、インピーダンス特性は最も良好であった。この結果は、ふっ素樹脂が優れた耐候性を有していることと一致する。一方、合計膜厚が厚く錆発生がほぼ皆無であったK2、K3においては、インピーダンス特性は明らかに劣っており、塗膜表面にはクラックやポイドが認められた。すなわちK2、K3のインピーダンス特性の低下はエポキシ樹脂の耐候性の悪さを反映したものと考えられる。また、一般的に耐候性に劣るとされるK7（タールエポキシ樹脂）については、現地の杭の位置関係上、日照が当たらず、紫外線による劣化が進まなかったため、一般部のインピーダンス特性が良好な結果となっていたものと考えられる。

これらの結果より、耐候性が劣る塗装または紫外線による劣化が進みやすい環境は、長期における防食性に対して不利に働くといえる。超厚膜エポキシ樹脂塗装工法が日照の当たる条件に施工される場合には、何らかの上塗りを塗装し、防食の主体を担うエポキシ樹脂の耐候劣化を抑制することで、更なる長期防食性が期待できると考えられる。

3.4.2 インピーダンス特性 (EIS) に関する考察

今回の調査において、特に電気化学インピーダンス計測により重要ないくつかの知見が得られた。ここでは、錆発生部からの距離とインピーダンスの関係、付着力とインピーダンスの関係に着目して考察を行う。

(1) 錆発生部からの距離とインピーダンスの関係

今回の調査において、過去補修箇所近傍のインピーダンスは錆発生の有無に関係なく、低下傾向にあった。詳細な現象の解明は今後の課題ではあるものの、恐らく、補修塗料とオリジナル塗膜との境目から長期間かけて少しずつ腐食因子が浸透し、塗膜下での付着劣化や腐食が広がっていくのではないかと考えている。このことは、K10海側における鋼材素地観察部は外観上錆発生が認められなかったにもかかわらず、鋼材面に錆が発生していたこと等からも裏付けされる。

また、過去補修部とは無関係である、錆発生部近傍においてもインピーダンス特性が低下することが実測データによって確認された。そこでいくつかの杭について

錆発生部先端からの距離と、本検討においては塗膜抵抗を強く反映すると考えられる1Hzにおけるインピーダンスの関係をまとめたものを図-3.6に示す。K6は他の杭に比較して、錆発生部からより広い範囲で値が低下しており、劣化が進んでいることがわかる。逆に、K10は値が低下している範囲が明らかに狭いといえる。この図においてカーブがより左上になるような塗装仕様は、補修・塗り替え時のメンテナンス範囲が狭くなり、それに伴うコストの抑制が期待できる。またこの図より、塗膜の劣化範囲の大小は、塗膜の耐候性、バリアー性、亜鉛末塗料塗膜いずれも影響していることが示唆される。

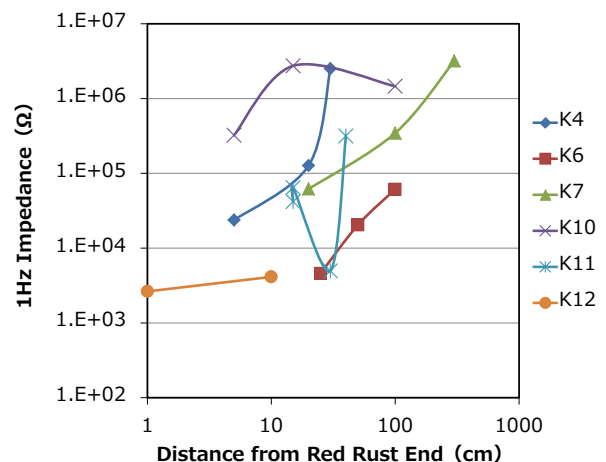


図-3.6 錆発生部からの距離とインピーダンスの関係

(2) 付着力とインピーダンスの関係

塗装における電気化学インピーダンス特性は、塗膜の吸水特性やバリアー性、あるいは付着性を反映する。そこで今回の調査においてインピーダンス計測部位近傍で付着力を測定した箇所についてデータを抽出し、付着力と1Hzにおけるインピーダンスの関係を図-3.7に示す。

これら2者の間には一定の相関関係が認められることが明らかとなった。ここで、付着力測定における剥離部位が、鋼材/塗膜界面、あるいは錆層/塗膜界面、またあるいは塗膜凝集破壊に関係なく、得られた強度とインピーダンスから得られる抵抗に一定の関係が見られた点は

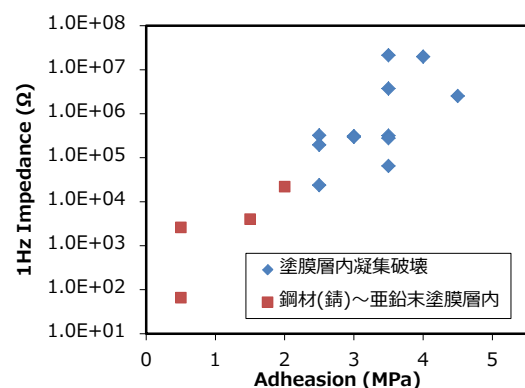


図-3.7 付着力とインピーダンスの関係

大変興味深い。電気化学インピーダンス特性は、鋼材～塗装表面までのトータルのバリアー特性を電気化学的に表している。一方、付着力試験より得られる結果は、塗膜の強度（おそらく、バリアー性に大きく関与）に関する劣化が塗装～鋼材の深さ方向におけるどの深度で最も顕著に起きているかを特定していると考えられる。結果として、両者に相関関係が生じたと考えると理解しやすい。

3.4.3 劣化メカニズムに基づく維持管理の高度化に関する考察

今回の調査より得られた結果を基とし、超厚膜エポキシ樹脂塗膜の劣化進展モデルを図-3.8に示す。塗装初期よりエポキシ樹脂は紫外線や水分の攻撃にさらされ、種々の化学的分解により低分子量化し、これが雨や波などの自然環境由来の外力によって消失する。やがて内部からの低分子成分等の溶出などにより水分が浸透する空隙を生じる（図-3.8(A)→(B)）。30年経過した現在においては、塗膜表層からの減耗と同時に、内部の劣化も大きく進み始めた状態（図-3.8(B)～(C)）であると思われる。すなわち、付着力試験においてエポキシ樹脂塗膜層の凝

集破壊となりインピーダンスが比較的良好であった部位は(B)であり、亜鉛末塗料層～エポキシ樹脂塗料層の凝集破壊となりインピーダンスにおいて劣化が認められた部位は(C)に相当するものと推定される。

以上をまとめると、塗装工法の維持管理について以下のような手法が考えられる。塗装工法の錆発生部を削り、ここより導通点を取り、インピーダンスを広範囲に計測することで、非破壊にて劣化範囲を広範囲に見極めることができる。その結果明らかに劣化していることが予想された部位について付着力を測定し、同時に塗膜内の劣化深度を判定する。

このような手順を取ることで、より効率的な補修範囲の特定および補修計画が策定できるようになる。上記の手順について図-3.9に示す。ただし、劣化指標に関して、維持管理上の限界値（閾値）を一律に設定することは現状では難しいと考える。その理由は、塗装工法の中においても、本章で説明してきたように様々な塗装仕様が存在しており、塗り重ね層毎の防食に対する効果・寄与が種々あり、それらが効果的に組み合わせられて長期防食性を決めると考えられるためである。

よって、同一塗装工法内における一般部（健全部）で得られる特性を基本とし、この特性と比較しつつ劣化が生じている範囲および劣化の程度を適切に把握することが、より合理的な維持管理時における性能評価手法であると考えられる。なお、各種塗装工法における、一般化された閾値の設定については今後の研究課題としたい。

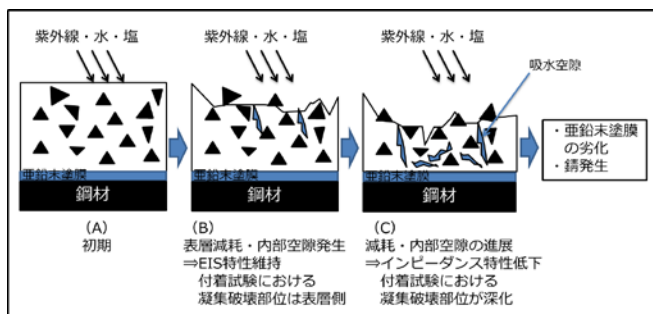


図-3.8 超厚膜エポキシ樹脂塗膜の劣化進展の概念

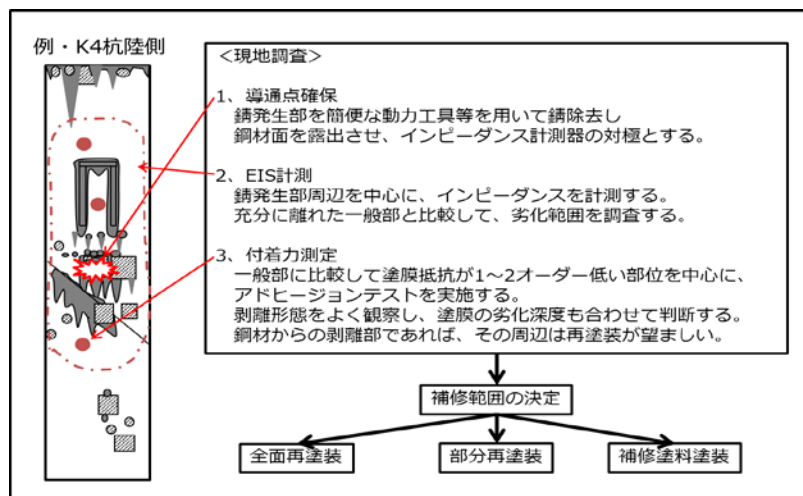


図-3.9 塗装工法の調査フロー案

3.5 まとめ

(1) まとめ

海上大気中部に適用された多数の塗装工法に対する30年にわたる調査により、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 亜鉛末塗料を塗装した上に超厚膜エポキシ樹脂塗を塗装する仕様においては、30年経過時において、鋼材の腐食が確認されなかった。今回の仕様よりも、亜鉛末塗料の膜厚を増大させる、あるいは耐候性に優れた上塗りを適用することで、30年を越える長期の防食性が期待できると考えられる。
- 2) 亜鉛末塗料の上にガラスフレークエポキシ樹脂塗料を適用する手法については、塗膜の減耗速度の低下が期待できることが確認された。これに耐候性の優れた上塗りを適用することで、現状のガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法よりも優れた長期防食性が期待できると考えられる。
- 3) 塗装工法において、塗装下の鋼材が錆を発生するより前に、塗膜の劣化を電気化学インピーダンス法によってほぼ非破壊で検知できる可能性が示された。このことは、「インピーダンス（≒塗膜抵抗、吸水特性）」を劣化指標として、防食性能の評価および劣化予測が可能となることを示唆するものである。
- 4) ただし、何らかの原因により部分補修を施した場合、その周辺部の劣化が速まるので注意を要する。このような状況からも、維持管理や劣化判定のための調査は、従来の付着試験や塗膜採取といった破壊試験ではなく、電気化学インピーダンス法のような高精度でかつ非破壊的な手法を的確に用いることによって塗膜に与える損傷を最小限とすることが望ましいと考える。

(2) 今後の課題

今回の調査により、塗膜は劣化したものの、鋼管杭としてはまだ健全な状況にあった超厚膜エポキシ樹脂塗工法（K2, K3杭）については、今後どのように錆が発生・進行していくのか、その過程を把握する必要がある。

また、塗装工法については今回の知見を活かし、長期防食性を更に延ばす改良や、現状工法についての効果的な補修工法（劣化範囲の判定方法も含む）の確立が今後の課題である。

また、20年調査時から30年調査時にかけて、電気化学インピーダンス計測装置や各種分析装置が進歩し、結果として20年時の調査結果の解釈（例えば、塗膜の絶縁抵抗や塩素浸透深さ等）に一部誤りがあった可能性も否定できない。そのため、過去のデータの測定精度は低いと

判断し、塗装工法の劣化の経時変化に関する検討については、今回は行わなかった。今後については、今回と同様な計測を継続し、塗装工法の性能評価および劣化予測手法の高度化に関する検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 宮田義一・阿部正美・濱田秀則・清水一夫・中野啓眞・芥川博昭：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.

4. 水中硬化形被覆工法

4.1 はじめに

水中硬化型被覆工法は、海洋鋼構造物の海水中～飛沫帯の長期防食を目的とした防食工法であり、一般的にペイントタイプ、パテタイプの2種類がある。主剤樹脂として、いずれもエポキシ樹脂系が用いられている。複雑な形状の構造物にも施工が可能で、また補修材としても有効である。

2004年の20年時の詳細調査においては、中程度のチョーキングはあるものの絶縁抵抗は概ね $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度を有しており、また鋼材の腐食は見られず、防食機能は維持されている状態であった。その後の10年間においては、部分的な点錆も発生してきている状況である。

本工法については、適用実績は多いものの、実環境での長期耐久性の実態、劣化メカニズムおよび防食性能の評価手法・劣化予測手法については、未だ確立されていないのが現状である。

以上のことを踏まえ、本検討では、20年時の詳細調査同様の調査を実施し、劣化変状に伴う性能低下予測の有効的手法を検証すると共に、その劣化メカニズムについて考察した。

4.2 調査内容

水中硬化形被覆工法の30年時の調査対象杭は、図-2.2に示すNo.7, 10, 11, 18であり、表-4.1に調査対象杭の概要を示す。特に品質への影響があると思われる下地処理の条件についても記載した。本工法に適用された下地処理は、浮き錆や付着物等を除去する2種ケレン(パワーツール処理)のSt3(No.27,28)と、地鉄を露出させ完全に錆を除去する1種ケレン(ブラスト処理)のISO-Sa2 (No.10, 11), 同じ1種ケレンのISO-Sa2^{1/2} (No.7, 18)が採用され、除錆度は前者ISO-Sa2が除錆率67%以上¹⁾、後ISO-Sa2^{1/2}が95%以上¹⁾で品質が向上する。これらの下地処理条件と耐久性の関係について、表-4.2の調査項目に着目して評価を行った。

なお考察に当たっては、No.27, 28の極厚マスチック工法の20年経過時の調査結果²⁾データも活用した。これは、極厚マスチックが水中硬化形樹脂の一種であり、主な相違点は型枠内に注型する点のみであることから、若干仕様は異なるものの、同種材料として比較検討に用いた。

以下、水中硬化形被覆工法の各調査項目の内容を示す。

表-4.2 水中硬化形被覆工法の調査項目

対象の鋼管杭 No.	7	10	11	18
絶縁抵抗測定	○			
インピーダンス測定		○	○	○
付着力試験(アドヒージョンテスト)	○	○	○	○
塩化物イオンの浸透深さ測定	○	○	○	○
塗膜厚み測定	○	○	○	○
鋼管杭の肉厚測定	○			

(1) 外観観察

外観スケッチおよび写真記録は毎年実施した。主に変状が現れた部位に関しては、その起点や形状特性に着眼した。

(2) 絶縁抵抗測定

No.7杭で実施した。測定位置は+1.5mの陸側で、外観上腐食が発生していない部位を測定した。過去の調査では測定値のバラツキが多数発生したため、今回30年時の調査では測定部の付着塩分量をコントロールするとともに、過去同様に電極をカバーで覆い、当該空間へ湿度50%未満のドライエアーを循環送風することで、更なる被覆表層での漏洩電流低下を図った。具体的には、まず塩化物イオン除去のため、測定位置付近をイオン交換水で洗浄させた(これにより付着塩分量が $100 \text{mg}/\text{m}^2$ から $22 \text{mg}/\text{m}^2$ まで低下)。次に、アルミ箔製の電極(5×5cm)をCMC糊で貼付け、写真-4.1に示すようにプラスチック製BOXを設置し、水分除去のため乾燥空気にて内部を乾燥させた後、写真-4.2に示す絶縁抵抗測定装置(東亜DKK製, SM-8210)を用いて、鋼板とアルミ箔製電極の間に500Vの直流電圧を印加し、印加後1分後の抵抗値を測定した。

表-4.1 30年経過時の調査対象杭の概要

No.	水中硬化形被覆種類	膜厚	下地処理	防食範囲	施工時期	現状の劣化度 ()は最終年
7	ペイント+パテタイプ	ペイント0.6mm	ISO-Sa2 ^{1/2}	+2.45~+5.15	1985.8	(経過12年でa)
		パテ3mm以上		-0.45~+2.45		c
10	パテタイプ	3mm以上	ISO-Sa2	-0.67~+5.15	1986.6	b
11	パテタイプ	3mm以上	ISO-Sa2	-0.67~+5.15	1986.6	b
18	パテタイプ	5mm以上	ISO-Sa2 ^{1/2}	-0.23~+5.27	1984.6	c
27	極厚マスチック (型枠注型工法)	10mm以上	ISO-St3	-1.53~+5.15	1984.8	(経過18年でb)
28						



写真-4.1 絶縁抵抗測定状況



写真-4.4 インピーダンス測定装置



写真-4.2 絶縁抵抗測定装置

(3) インピーダンス測定

No.10, 11, 18 杭で実施した。測定位置は+3.5m～+4.6mの間で、外観上腐食が発生していない部位を測定した。**写真-4.3**のようにアルミ箔（5×5cmまたは10×10cm）を電極としてCMC糊で貼付け、**写真-4.4**に示す $10^3\text{M}\Omega$ まで測定できる塗膜用のインピーダンス測定装置（DELICA製、D-55A）を使用して周波数は200～5,000Hz間で計測し、1,000Hz時の測定値を絶縁抵抗として評価した。

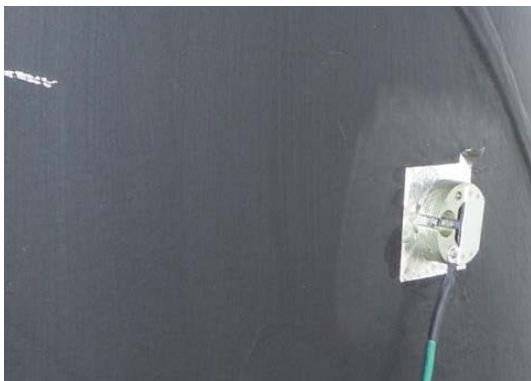


写真-4.3 インピーダンス測定状況



写真-4.5 アドヒージョンテスター



写真-4.6 測定状況

(5) 塩化物イオンの浸透深さ測定

+1.5m以上の位置で外観上腐食が発生していない部位をサンプリングし(3×3cm)、当該塗膜の一部をエポキシ樹脂で埋め込み、評価試験体を作製した。その試験体を

EPMA（電子線プローブマイクロアナライザー）にセットし、カーボン蒸着を行った後、Cl元素を分析した。測定範囲は、塗膜の暴露表面より深さ方向に8000 μm 、幅2000 μm 間を走査し、**図-4.1**に示す積算ピークより濃度検知マッピングを構成した後、塩素イオンの浸透度（単位： μm ）として検知深さを算出した。

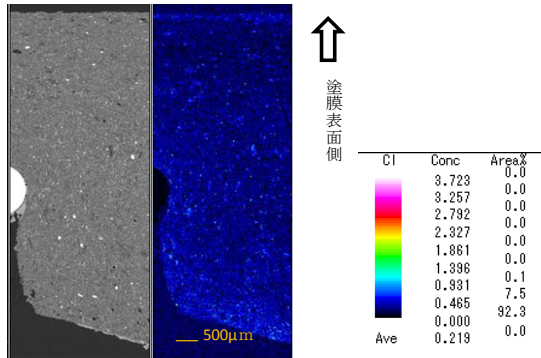


図-4.1 塩化物マッピング例

(6) 塗膜厚み測定

塗膜厚みを、電磁誘導方式膜厚計（サンコウ電子研究所製、SL-120C）にて測定した。測定位置は+1.5m以上で、外観上腐食が発生していない部位を測定した。測定状況を**写真-4.7**に示す。



写真-4.7 膜厚測定状況

(7) 鋼材の肉厚測定

水中硬化形被覆工法では杭No.7のみ肉厚測定を実施し、No.10, 11, 18は鋼材表面観察を実施した。なお測定位置は+1.5m以上で任意の部位を測定した。

4.3 調査結果

(1) 外観観察結果

写真-4.8と**図-4.2**に、例としてNo.7の30年時の外観写真とスケッチを、また、代表的な外観変状を**表-4.3**に示す。下地処理の程度を含め施工等の品質不良が残存した場合、暴露後3年以内に塗膜浮き、剥離、発錆の変状が発

生した（No.27, 28：極厚マシック工法）。また初期の経時変状の起点は、薄膜部、衝撃跡、多重接着面にて起こっていた（No.7, 18）。変状発生部の部分補修箇所については、補修前の下地処理がハンドツールによる3種ケレン（ISO-St2）となることから、残存塗膜部への飛来塩分の含有、養生環境の確保困難等の要因により、健全部と比べ耐久性が劣るケースが多かった（No.18, 27, 28）。



写真-4.8 外観（杭No.7）

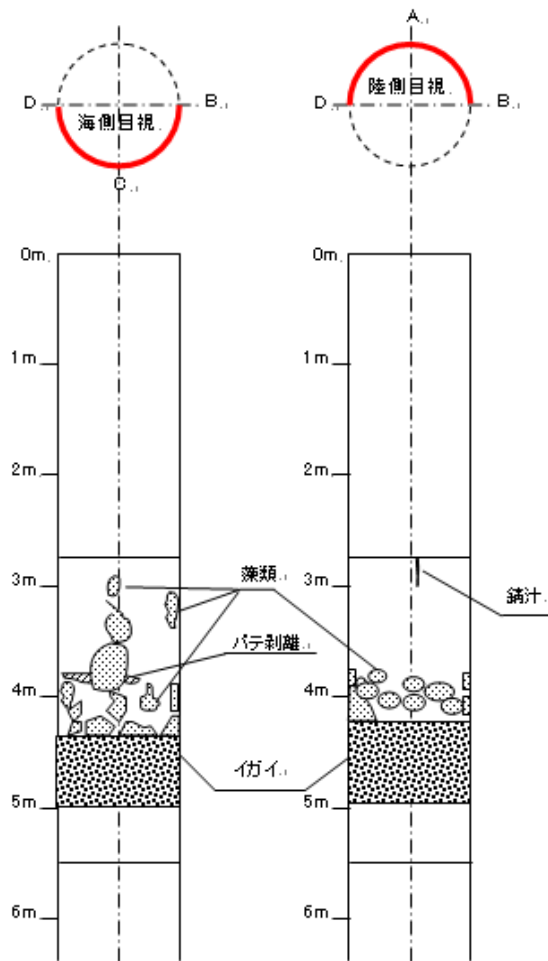


図-4.2 外観スケッチ（杭No.7）

表-4.3 外観変状

杭No.	仕様	経年	外観変状の特徴
No.7	ペイント 0.6mm+ パテ3~5mm	18年時	パテの一部に剥離が見られるが鋼材(鋼管杭)の腐食は認められない
		20年時以降	H.W.L以下ではパテ剥離の進展が顕著
No.10, 11	不飽和ポリエステル系パテ 3mm以上	5年時以降	退会会社分の為データ未取得
		29年時	新規防食試験の為細調査実施。表面に微小発錆有。発錆率は0.3%程度
No.18	パテタイプ 5mm以上	20年時	上部コンクリートとの取り合い部の7点に極小さな滲み錆を確認
		22年時	昨年補修を行った上部工コンクリート地際部の補修箇所から再度発錆が見られた
		29年時	漂流物の衝突によると思われる塗膜はく離が3箇所見られた
		30年時	表面全体にクラック発生有。指触試験で吸湿確認
No.27	極厚マスタック型枠注型法、膜厚10mm	1年時	塗覆装全体に白亜化が認められる
		3年時	上段パテ接合部で発錆、下端パテ部は剥離現象確認。施工起因との原因推定
		12年時	昨年実施した塗膜サブリング部の補修部を起点に塗膜浮きと発錆を確認
		14年時	12年目に補修した箇所の塗膜剥離を確認
		17年時	上記再補修部で塗膜の脱落
No.28	極厚マスタック型枠注型法、膜厚10mm	19年時以降	上端内継ぎ部での錆び汁の流出および干満帯の上記現象は以降拡大
		3年時	下段のパテによる接合部で密着不良による剥離、ひび割れ発生
		12年時	昨年実施した塗膜サブリング部の補修部を起点に塗膜浮きと発錆を確認
		17年時	上記再補修部で塗膜の脱落
		20年時以降	上端内継ぎ部での錆び汁の流出および干満帯の上記現象は以降拡大

(2) 絶縁抵抗

絶縁抵抗の経時変化を図-4.3に示す。なお、杭No.10, 11, 18で測定したインピーダンス(単位: Ω)については、電極面積を乗じ、絶縁抵抗(単位: Ω・cm²)として表記した。一般的にインピーダンス測定では、測定周波数による抵抗値の変動が見られるが、30年近く経過した今回の対象材の場合、塗膜全厚みにわたる塩分透過(4)で説明)が確認されていることに起因して、周波数特性での変動幅が少ないことが確認されている。よって、インピーダンスを絶縁抵抗に変換しても大きな影響はないと判断した。また、インピーダンス測定の特徴である周波数特性は、顔料が多く含まれる水中硬化形被覆樹脂にはその特性がバラツキとして発生しやすいこと、および被膜劣化時の鋼面近傍の特性が現れやすいとの理由により、絶縁抵抗の方が当該工法の性能評価に適していると判断し、整理を行った。

20年調査時には、絶縁抵抗は経時と共に増加傾向との報告がなされていたが、測定時のバラツキ(温度、湿度、表面付着塩分)の影響があったと思われる。20年経過以降に絶縁抵抗値の低下傾向が発生しており、いずれの水準においても健全性の目安とされる10⁸Ω・cm²を下回り、防食機能が低下していると推察される。また下地処理品質との関係は、ISO-Sa2¹/₂(除錆率95%以上)のNo.7,18と、

ISO-Sa2(除錆率67%以上)のNo.10,11では、30年経過時において明らかな有意差があると考えられた。

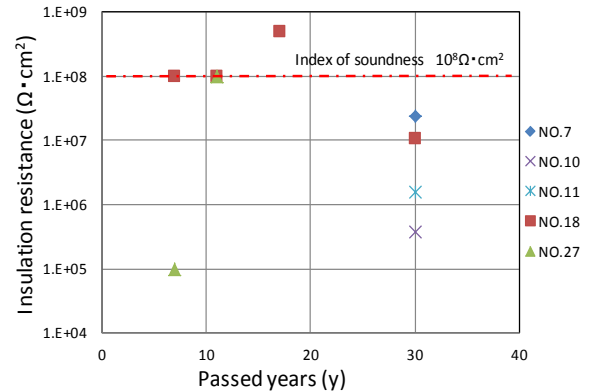


図-4.3 絶縁抵抗の経時変化

(3) 付着力

付着力の経時変化を図-4.4に示す。20年から30年にかけて、いずれの場合も付着力は低下傾向を示した。

No.7およびNo.10, 11の一部の付着力試験の剥離破壊形態が鋼面との界面剥離であり、他の杭では塗膜凝集破壊であった。この現象は、一般的に塗膜剛性が起因するとされていることから、各材料の組成の違いによる有意差と判断できる。

20年時では健全性の目安とされる2N/mm²を下回るものがあったが、剥離破壊形態が塗膜凝集破壊であり、接着性は保持されていたと推察される。一方、30年時では界面剥離に移行しており付着力低下が検出されたことから、防食機能の限界に近づいていると推察される。なお、No.18については1N/mm²程度の付着力で塗膜表面・接着剤間の剥離となった。この理由としては、塗膜が吸湿していたため接着剤が塗膜に十分に接着しなかったことが考えられた。また下地処理品質との関係は、30年時における付着強度に差が無く、その有意差は確認できなかった。

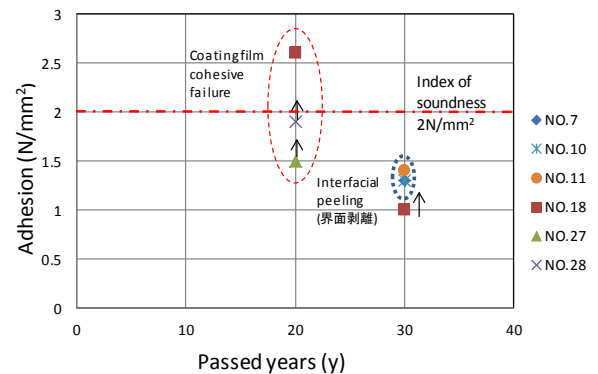


図-4.4 付着力の経時変化

(4) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオン(Cl)浸透深さの測定結果を図-4.5に、経時変化を図-4.6に示す。20年調査時の解析手法は、Clの吸収強度に基づく塗膜内強度分布により塗膜表面側の変化のみを浸透量として判断していた。近年データ解析技術が進歩し、Clの吸収強度を色別にマッピング表記することが可能になり、その識別を埋め込み樹脂上でのCl吸収強度と比較することで、塩分の浸透状況が塗膜全厚みにわたって明確に判断できるようになった。

この解析手法に基づく30年時のNo.7および29年時のNo.10, 11は塗膜全厚みにわたるClの浸透が確認された(図中↑は微量ではあるが全塗膜にClが浸透したことを示す)。塩素イオンは水和構造をとるため、塩素イオンの透過は同時に水の透過も示唆している。なお、No.18については、図-3.5と同様の方法にて分析し、塗膜樹脂部への塩素の微量の浸透が別途確認された。以上より、いずれも鋼材が腐食環境に近づいていることがうかがえた。

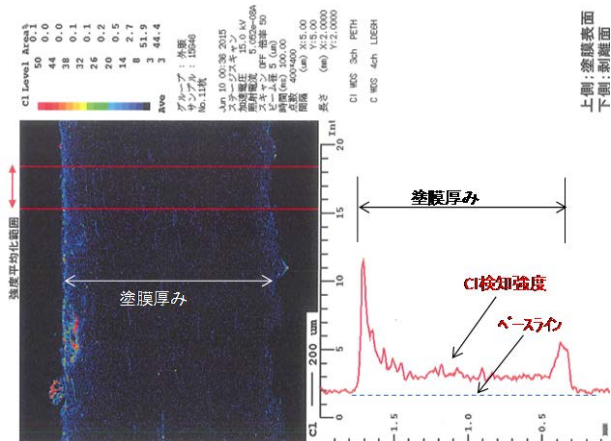


図-4.5 水中硬化形被覆工法の塩化物イオン浸透深さ測定結果 (杭 No.10)

(左: Cl イオンマッピング, 右: イオン強度グラフ)

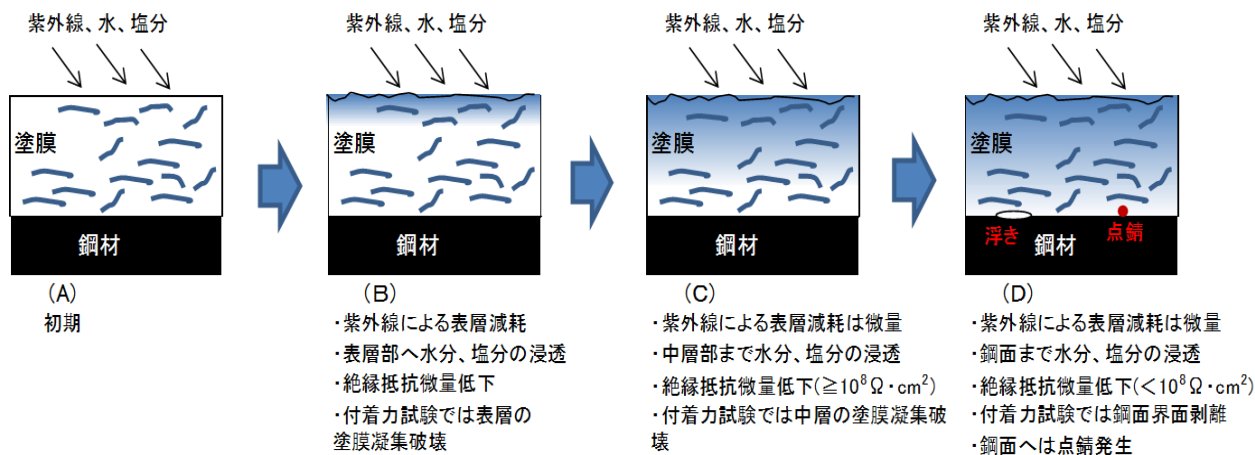


図-4.7 水中硬化形被覆工法の劣化進展の概念

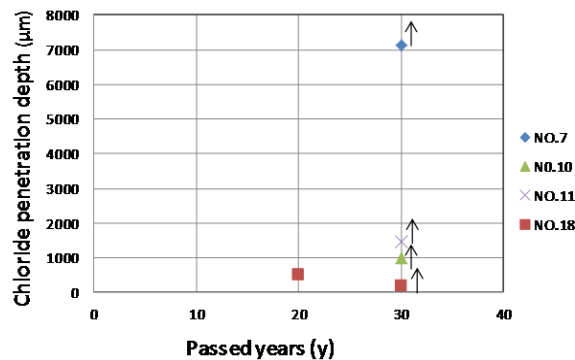


図-4.6 塩化物イオン浸透深さの経時変化

4.4 防食性能評価及び性能低下予測手法に関する検討

(1) 防食性能評価

H.W.L以上に適用されたペイントタイプでは厚さ0.6mm以上の仕様で7年経過時で点錆, 12年経過時で発錆拡大しており, 10年程度の耐久性と評価された。

一方, H.W.L以下に適用されたパテタイプ(厚さ3mm以上)では, 下地処理等の品質確保が困難の場合, 3年経過時より変状(発錆, 塗膜浮き, はがれ)が発生していた。

一方, 上記品質が確保された場合においては, 30年経過しても鋼材腐食は見られなかった。ただし, 塩化物イオンの浸透や付着力の低下が見られ, 鋼材が腐食環境に近づいていることが確認された。当該工法での期待耐用年数は20年程度⁵⁾とされているが, パテタイプ(厚さ3mm以上)で且つ下地処理がISO-Sa2^{1/2}以上で処理された場合, 期待耐用年数が20年以上となる可能性が示唆された。

(2) 性能低下予測手法に関する検討

水中硬化形被覆工法の性能低下に繋がる塗膜の劣化プロセスは、紫外線による損耗と、水分・塩分の浸透による塗膜の浮き・剥離へ進展する2形態が一般的である。波崎棧橋では、塗膜厚みが3mm以上の水中硬化形被覆工法が適用されている。その場合の劣化プロセスについては、一般的なエポキシ樹脂の紫外線損耗量 $10\mu\text{m}/\text{年}^6)$ を考慮すると $3000/10=300$ 年の耐久性であり、紫外線による損耗はほとんど影響しないと考えられる。また前項までの調査データを考慮すると、水分・塩分の浸透による塗膜の浮き・剥離が主要因であると推察される(図-4.7参照)。

当該モデルにおける付着力の変状は、その剥離破壊形態が初期は表層の塗膜凝集破壊であり、以降水分・塩分の浸透深さに伴い中層から下層へと経時にて凝集破壊位置が変化しながら発生強度も低下し、最終的には鋼面との界面剥離へと変状推移していく。その後、鋼面で錆が発生する。これは、塗膜内への水分・塩分の浸透と共に塗膜自体の膨潤軟化や加水分解による低分子化によって塗膜強度が低下し、鋼面へ到達した水分・塩分が鋼面と塗膜の接着機構を破壊することで界面剥離に至るためである。また、絶縁抵抗においても、水分・塩分の透過に伴い塗膜・鋼材間の絶縁物質が減少し電極間が近接化することで距離に相対して低下する。このことから、本検討での詳細調査手法(絶縁抵抗、付着力、塩化物イオン透過量)は性能劣化を定量的に示していると考えられる。

性能低下予測手法の考察に当たり、その指標として外観目視や、付着力および剥離破壊形態を採用した場合、前者では劣化プロセスでの残存寿命予測が定性的となり、後者では破壊検査を伴う。以上を勘案し、非破壊検査手法で定量性が表現できる絶縁抵抗を性能評価時の指標に選定し、検討を行った。

代表的なパテタイプにおける性能低下曲線を図-4.8に示す。膜厚や材料の特性はあるものの、20年時までは健全性の目安とされる $10^8\Omega\cdot\text{cm}^2$ を上回っていた。それ以降は鋼材の腐食環境に近づいて行き、30年時においては $10^8\Omega\cdot\text{cm}^2$ を下回り、鋼材腐食が確認された。この結果より、絶縁抵抗を劣化指標とした防食性能評価および性能低下予測の可能性が示唆された。

4.5 補修工法に関する検討

水中硬化形被覆工法への補修は、同系統樹脂の水中硬化形被覆工法が適用されるのが一般的である。杭No.18, 27, 28においても同様の補修が行われているが、いずれも下地処理はハンドツールの3種ケレン(ISO-St2)に起因し、補修後2~3年程度で塗膜の剥離や発錆が見られてい

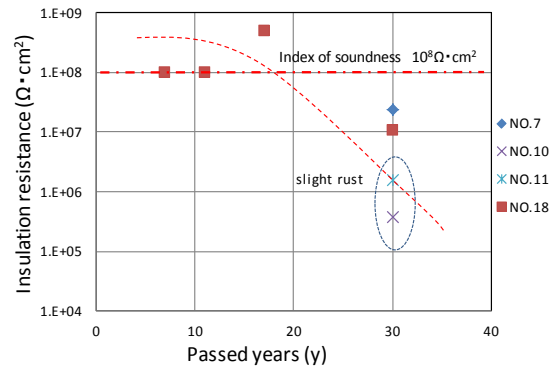


図-4.8 絶縁抵抗による性能低下曲線
(パテタイプ(厚さ 3mm 以上)の場合)

る。

一方、下地処理グレードが確保された状態で水中硬化形被覆工法により補修が行われた他の実構造物の場合、波崎棧橋のNo.7, 18(無防食鋼材に水中硬化形被覆を施工)と同様に、20年にわたり防食機能が発現していた実績がある。

以上の結果より、補修施工する際は下地処理品質の確保が重要であることが改めて確認された。以下に水中硬化形被覆工法による補修を適用される場合の品質管理ポイントを記載する。

- ・下地処理グレード: ISO-Sa2^{1/2}以上
- ・付着塩分量の低減: 清水洗浄
- ・下地処理から施工までの時間: 4時間以内

現地施工環境を考慮すると、乾式ブラストでの粉塵飛散対策、湿式ブラストでの排水回収が問題になることも考えられ、低グレードの下地処理においても品質確保可能な材料の開発・改良も今後の課題である。

4.6 まとめ

(1) まとめ

水中硬化形被覆工法について、30年にわたる調査により以下の結果が得られた。

- 1) 耐久性は、ペイントタイプより厚膜パテタイプの方が優位であった。パテタイプについて、下地処理品質が確保された部位では20年にわたり健全性が維持されていたが、30年時は、鋼材に点錆が確認され防食機能の限界に近づいていたことが確認された。
- 2) 外観上の劣化は、薄膜部、衝撃跡、多重接着面を起点として顕在化していた。この際の劣化の進展は、絶縁抵抗、付着力、塩化物イオン浸透深さによりその傾向が確認できた。
- 3) 劣化プロセスとして、水分・塩分の浸透によって塗

膜の浮き・剥離へ進展し、鋼材が発錆することが推察された。

- 4) 絶縁抵抗を劣化指標とした、防食性能の評価および劣化予測の可能性が示された。
- 5) 品質管理時において、下地処理の重要性が改めて確認された。

(2) 今後の課題

主な課題を以下に示す。

- 1) ある一定レベルの下地処理が必要なことが確認されたが、下地処理品質を確保するにはブラスト処理に伴う環境対策も課題であり、低グレード下地処理においても品質発現する材料側の改良も必要である。
- 2) 絶縁抵抗を劣化指標として提案したが、本測定手法については、4.2(2)に示したように、現地での測定は現状では容易ではない。より簡易かつ高精度な計測手法の確立が望まれる。

参考文献

- 1) The Society of Naval Architects and Marine Engineers : Abbraaive Balsting Guide for Aged or Coated Steel Surfaces, 1969.12.
- 2) 宮田義一・阿部正美・濱田秀則・清水一夫・中野啓真・芥川博昭：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, 2006.6.
- 3) R.Charles Bacon, Joseph J.Smith and Frank M.Rugg : Electrolytic Resistance in Evaluating Protective Merit of Coatings on Metals, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 40, No. 1, 1948.
- 4) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼構造物塗膜調査マニュアル, JSS IV 03-2006
- 5) (財) 沿岸技術研究センター：鋼湾構造物 防食・補修マニュアル(2009年版)
- 6) 日本塗料工業会：重防食塗料ガイドブック 第4版 (2013年)

5. 有機被覆工法（ポリエチレン被覆工法）

5.1 はじめに

ポリエチレン被覆は、ウレタンエラストマー被覆と並んで「重防食被覆」と呼ばれ、鋼管杭の防食工法の中でも、主に工場製品として最も広く普及している工法のひとつである。本工法は、工場製作のため一貫した管理が行われており、品質が安定している。また、施工法及び材料の特性から、耐久性、耐薬品性、耐海水性に優れ、カーボンブラックを配合することで耐候性を向上させている。現状では、鋼管矢板等の複雑な形状にも対応しやすいことから、ポリエチレン被覆よりもウレタンエラストマー被覆の方が一般的に使用されている。

ポリエチレン被覆工法は、1984年に波崎観測用栈橋での暴露試験を開始し、2004年の20年経過時の詳細調査において防食効果が維持されていたことを確認している¹⁾。

本工法は、長期耐久性が確認され、また多くの施工実績を有するものの、実環境での長期耐久性の実態、劣化メカニズム及び防食性能の評価手法・劣化予測手法については、未だ確立されていないのが現状である。

以上のことを踏まえ、30年経過時の調査では、暴露開始から毎年実施の外観検査に加えて、20年経過時からの10年間の経年変化の把握及び性能劣化予測に向けた基礎データ取得を目的として、20年経過時と同様の調査（付着力、被膜厚み、鋼材板厚、採取サンプル被膜の引張強度・伸び、体積固有抵抗、吸水率）を実施した。

また、30年経過時の調査では、新たな調査を試みている。まず、被膜劣化の定量的な評価を目的に、①水分・塩分除去によって現地での計測精度を向上させた体積固有抵抗の現地測定、②吸光度による劣化評価（FT-IR分析）を実施した。さらには、疵部からの被膜の接着劣化を把握することを目的に、①人工的に被膜を剥離して鋼面を露出させた人工疵部周辺の被膜と鋼面の接着劣化進展距離の測定、②人工疵部周辺の接着劣化を簡易に検出するための打音検査、を実施した。なお、疵部に関しては、より簡易で安価な部分補修工法の設置も試みた。

5.2 調査内容

ポリエチレン被覆工法の30年経過時の調査対象杭は、図-2.2に示すNo.31～35であり、栈橋の中で最も外洋側に位置する。表-5.1に調査対象杭の概要を、表-5.2に調査項目を示す。調査対象杭は、水中部から気中部にかけてポリエチレン被覆が施されており、標高+3.00m程度より高い飛沫帯の杭全周に対して、複数種類の現地補修方法を試験的に適用している。

以下に、ポリエチレン被覆工法の各調査項目の内容を示す。

(1) 外観観察

毎年実施の外観調査は、具体的には写真撮影とスケッチになる。表-5.1の飛沫帯の各種の現地補修方法に加えて、2011年には、水中部の現地補修方法として、-0.5mの位置にポリエチレンシート超音波溶着を適用しており、これらの補修試験部についても観察した。外観写真の代表例を写真-5.1及び写真-5.2に、ポリエチレンシート超音波溶着の状況を写真-5.3に示す。

(2) 体積固有抵抗（絶縁抵抗）測定

20年経過時の調査では、測定部を水拭き後、測定電極を覆うようにカバーを設置し、当該空間を窒素で置換することでポリエチレン表層での漏洩電流を小さくすることを試みた。更に測定精度を向上させるために、今回の30年経過時の調査では4.2(2)と同様の方法で測定を実施した。各杭の測定位置を表-5.3に示す。特にポリエチレン被膜のような遮蔽性の高い被膜に対しては、今回の測定部表層の塩化物イオン及び水分を除去する工夫は有効であると考えられる。

表-5.1 30年経過時の調査対象杭の概要

No.	防食工法	防食範囲 (m)	施工時期	現地補修方法の仕様
31	ポリエチレン被覆	-1.75 ～+5.15	1984.6	防食シート・防食テープ+FRPカバー (1985 施工)
32				
33		-1.77 ～+5.25		ペトロラムテープ+チタンカバー (2012 施工)
34				防食シート+FRPカバー (1985 施工)
35				

表-5.2 ポリエチレン被覆工法の各杭の調査項目

対象の鋼管杭 No.	31	32	33	34	35
外観	○	○	○	○	○
体積固有抵抗(絶縁抵抗)測定	○	○	○	○	○
付着力試験(ピール強度)	○	○	○	○	○
被膜厚み測定	○	○	○	○	○
鋼管杭の板厚測定	○	○	○	○	○
打音検査	○	○	○	○	○
サンプル調査	被膜の厚さ	○	○	○	○
	被膜の機械的性質(引張強度, 伸び)	○	○	○	○
	被膜の体積固有抵抗	○	○	○	○
	被膜の吸水率	○	○	○	○
	被膜の吸光度				

ここで、体積固有抵抗は被膜樹脂の抵抗で、絶縁抵抗は鋼材表面と被膜表面の間の抵抗である。絶縁抵抗には鋼材側の抵抗を含むことになるため、被覆下の鋼材が腐食し抵抗となる場合には、体積固有抵抗と絶縁抵抗では異なった測定条件となる。しかし、今回の場合、ポリエチレン被覆は防食性能を維持しており、被覆下の鋼材は腐食していない。従って、今回の絶縁抵抗の測定では、鋼材側の抵抗は無視でき、被膜樹脂自体の抵抗を示す体積固有抵抗と、実質上、測定条件の差はなくなる。このため、(絶縁抵抗) = (体積固有抵抗) × (被膜厚) とみなすこととした。

(3) 付着力試験

JIS G 3469に準拠したピール強度測定で付着力を測定した。測定状況を写真-5.4及び写真-5.5に示す。また、各杭の測定位置を表-5.4に示す。

(4) 被膜厚み測定

4.2(6)と同様の方法で測定を実施した。各杭の測定位置を表-5.5に示す。

(5) 鋼管杭の板厚測定

ポリエチレン被覆工法では、写真-5.6に示すように、20年経過時の調査の際にポリエチレン被膜をサンプル採取した箇所右隣で、30年経過時の調査でのサンプル採取を行った。バール及びハンマー等を用いて、約200×200mmのサンプルを採取した。その上で、写真-5.7に示すように、鋼面露出部に対して、鋼管杭の板厚測定(帝通電子研究所, UDM-750)を実施した。各杭の測定位置を表-5.6に示す。

(6) 打音検査

人工的な疵部周辺での剥離進展の確認法として、今回

はじめて打音検査を実施した。20年経過時の調査の際に採取部に施したFRPカバーを全撤去し、その周囲の表面を写真-5.8に示すように、ゴムハンマー(頭径45mm, 全長240mm, 質量260g)で打音し、浮きが発生していないか調査した。また打音検査の有効性を検証するため、対象部分の被膜を剥離し、被覆の浮き等を確認した。



写真-5.2 外観写真 (杭 No.32)



写真-5.3 水中部のポリエチレンシート溶着による試験補修部の写真 (杭 No.34)



写真-5.1 外観写真 (杭 No.33,34,35)

表-5.3 現地での体積固有抵抗の測定位置

杭 No.	31	32	33	34	35
レベル	+5.0 付近	+5.0 付近	+3.5 付近	+5.0 付近	+5.0 付近
箇所*	陸側	陸側	陸側	陸側	陸側

※海側は鋼管杭防食部分の外洋側の半周部の範囲を、陸側は陸地側の半周部の範囲を指す。



写真-5.4 ピール強度測定状況（バネ秤）



写真-5.5 ピール強度測定部（杭 No.32）

表-5.4 現地での付着力測定位置

杭 No.	31,32,33,34,35
レベル	+3.5 付近
箇所	陸側

表-5.5 現地での被膜厚み測定位置

杭 No.	31,32,33,34,35			
レベル	+3.5 付近		+5.0 付近	
箇所	海側	陸側	海側	陸側



写真-5.6 鋼管杭の板厚測定部の外観（杭 No.33）



写真-5.7 鋼管杭の板厚測定状況（杭 No.33）

表-5.6 現地での鋼管杭の板厚測定位置（ポリエチレン被膜のサンプル採取位置）

杭 No.	31,32,33,34,35
レベル	+2.5 付近
箇所	陸側



写真-5.8 打音検査状況

(7) ポリエチレン被膜のサンプル採取による調査

5.2(5)に示した要領で採取したポリエチレン被膜を試験室に持ち帰り、厚さ、引張強度、体積固有抵抗、吸水率、吸光度を調査した。各杭のサンプル採取位置は表-5.6に示した位置と同じである。

1) 被膜の厚さ

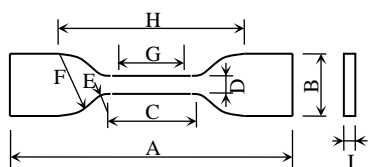
マイクロメーターを用いて被膜の厚さを測定した。測定状況を写真-5.9に示す。



写真-5.9 被膜厚さ測定状況

2) 引張強度

採取したサンプルの表面疵をナイロンブラシ等で除去したのち、所定の形状に切り出し、JIS K 7113に準拠した引張試験を行った。試験温度は23℃、引張速度は50mm/minである。試験片形状を図-5.1に、測定状況を写真-5.10に示す。



A: 全長	115	F: 大半径	22±2
B: 両端の幅	25±1	G: 標線間距離	25±1
C: 平行部分の長さ	33±2	H: つかみ具間距離	80±5
D: 平行部分の幅	6±0.4	I: 厚さ	1~3
E: 小半径	14±1		

図-5.1 試験片形状



写真-5.10 引張強度測定状況

3) 室内試験による体積固有抵抗

図-5.2及び写真-5.11に示すように採取したサンプルを鋼板の上のせ、アルミ箔を主電極用(50×50mm)と

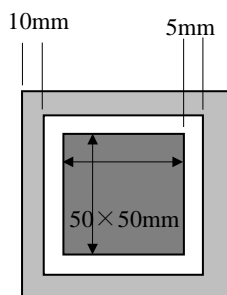


図-5.2 電極形状

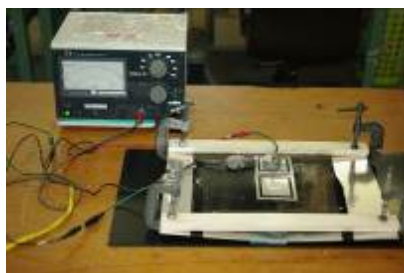


写真-5.11 体積固有抵抗測定状況

ガード電極用のサイズ(内枠:60×60mm, 外枠:80×80mm)に切断し、電導ペーストを塗布し被膜面に貼り付けた。電極の貼り付け後30分以上待機した後、絶縁抵抗計(東亜DKK, SM-8210)にて測定を実施した。印加電圧は100Vとした。

4) 吸水率(JIS K 7209)

採取したサンプルを100×100mmの大きさに切り出し、50.0±2.0℃の恒温槽にて24±1時間乾燥させ、その後デシケーターに入れ室温になるまで冷却し、0.1mgの単位まで質量を測定した。その試験材を23.0±2.0℃の蒸留水に24±1時間浸漬した後、水から取出し表面を清浄な布で拭き取り、水から取り出してから1分以内に質量を0.1mgまで測定した。写真-5.12に試験状況を示す。なお、吸水率は以下の式により算出した。

$$\text{吸水率} = \frac{\text{浸漬後の試験片質量} - \text{初期乾燥後浸漬前の試験片質量}}{\text{初期乾燥後浸漬前の試験片質量}} \times 100$$



写真-5.12 吸水率測定状況

(左上: 恒温槽, 右上: 恒温槽内状況,
左下: 計量器, 右下: 蒸留水浸漬状況)

5) 吸光度 (FT-IR分析)

ポリエチレンの分子レベルでの酸化進展度から被覆材の劣化進行度を把握する目的で、今回はじめて吸光度分析を実施した。ここで、紫外線や熱によるポリエチレンの表面から内部に向かって起こる酸化劣化については、カルボニル基の分析によるポリエチレンの寿命推定法が検討されている²⁾。この方法は、ポリエチレンの分子が切断されるとともにカルボニル基が生成し、それらが酸素拡散によって深化する劣化機構に着目したものである。

この方法を用いて30年間暴露されたポリエチレン被膜の表層劣化を検証した。供試体はサンプリングしたポリエチレン被膜の任意の場所から採取し、透明エポキシ樹脂に埋め込み研磨後に表面から400μm深さまでと、表面から2000~2400μm深さまでの2点のポリエチレン被膜の厚さ方向について、微小領域FT-IR分析(CH₂ 1450cm⁻¹, C=O

1740cm¹) を行い、ポリエチレン被膜の厚み方向での紫外線劣化の有無を確認した。なお、本試験は、紫外線照射が大きかったと推察される栈橋の最も外洋側の突端に位置するNo.35杭から採取したサンプル材を用いて実施した。

5.3 調査結果

(1) 外観観察

図-5.3に、一例としてNo.32杭の30年経過時の外観スケッチを示す。ポリエチレン被膜は経時とともに光沢の低下、及び若干の変色が確認される程度で、防食機能低下に繋がる大きな変状（浮き、剥離等）は見られなかった。

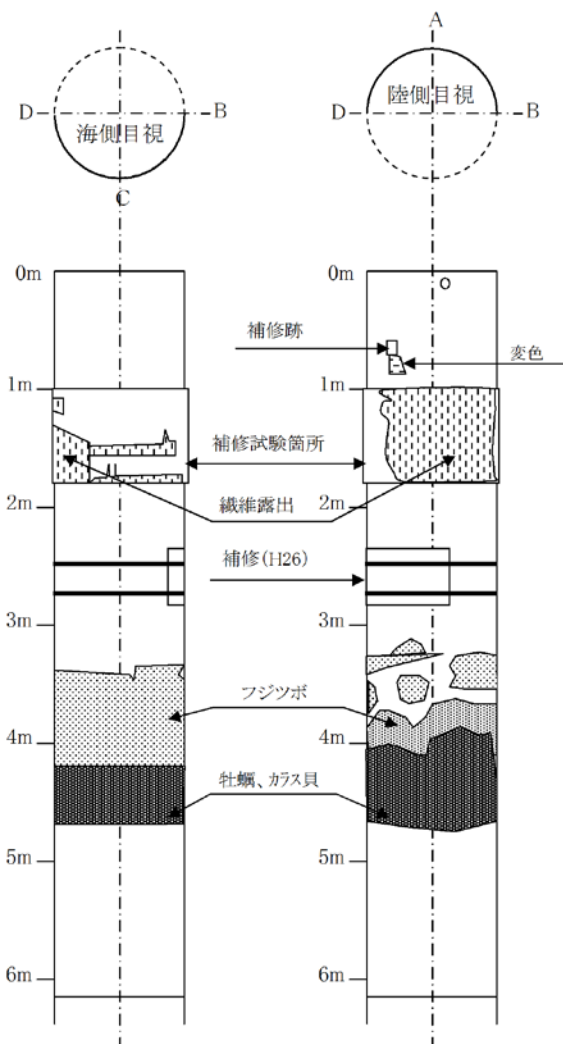


図-5.3 杭 No.32 の外観スケッチ (30年経過時)

(2) 体積固有抵抗 (絶縁抵抗)

図-5.4に、10年、20年及び30年のそれぞれの経過時に現地で測定した体積固有抵抗の結果を示す。経時とともに体積固有抵抗の増加傾向がみられるが、これは材料性能が向上したとは考えにくいので、各測定時期で、5.2(2)

に示した被覆表面の電流漏洩を抑える測定時の工夫によって現地測定精度が向上したためと考えられる。20年経過時には、図-5.4の現地での測定値は $10^8 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ であるが、図-5.10に示すポリエチレン被膜の採取サンプルに対する室内試験での測定値は $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、現地試験と室内試験での測定値に乖離がある。これに対し、30年経過時には、図-5.4の現地での測定値は $10^{10} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 、図-5.10の室内試験の測定値は $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ となっており、両者は比較的近い値を示した。初期の付着塩分量 100mg/m^2 を 22mg/m^2 に低下させたこと、及び測定環境を乾燥雰囲気としたことにより、測定精度が向上したと推察される。

ただし、図-5.10の室内試験の測定値は各杭でほとんどバラツキがないのに対して、図-5.4の現地計測ではバラツキが大きい。室内試験結果との対比から、現地計測の精度は $\pm 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以内に留めることができたものの、維持管理の指標として用いるには、一層の精度の向上を図る必要がある。

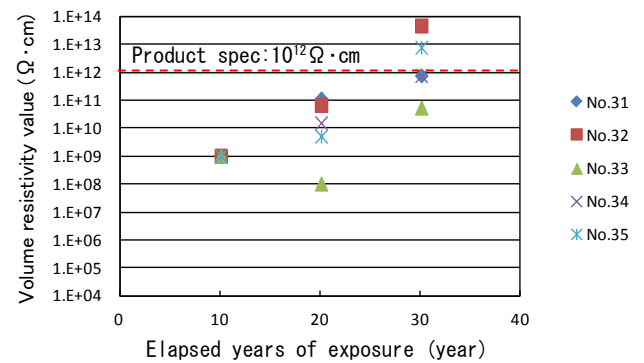


図-5.4 現地測定による体積固有抵抗の経時変化

(3) 付着力

図-5.5に示すように、ポリエチレン被覆工法の付着力は30年経過時においても高い値を示し、製品仕様の35N/cm (図中に破線で表示) 以上を満たしていた。



図-5.5 付着力の経時変化

(4) 被膜厚み

図-5.6に示すように、ポリエチレン被覆工法の被膜厚は30年経過時においても変動が少なく、製品仕様2.5mm（図中に破線で表示）を満たしていた。

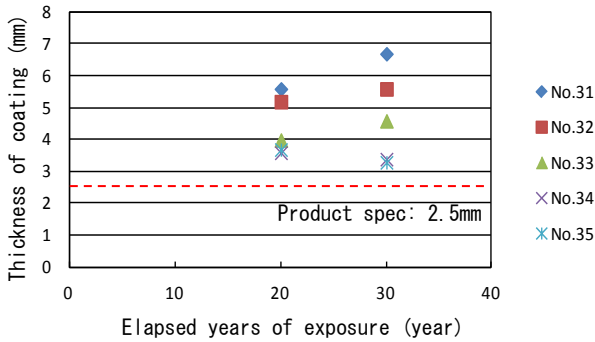


図-5.6 被膜厚の経時変化

(5) 鋼管杭の板厚

図-5.7にサンプル採取部における鋼管杭の板厚経時変化を示す。今回、ポリエチレン被膜を採取し鋼面を露出させた部分で測定した鋼管杭の板厚は、微量の減肉傾向が認められた。この理由としては、板厚測定部が過去のサンプル採取部の近傍であったことが影響していると考えられる。詳細を以下に述べる。

今回の30年経過時の調査では、20年経過時の調査の際のサンプル採取部の隣接部でポリエチレン被膜を採取しており、写真-5.13に示すように、20年経過時のサンプル採取部端部から進展した被覆の接着劣化が確認されている。20年経過時のサンプル採取部は、全ての杭に対して鋼面露出部にペトロラタムを施し、保護層としてFRPカバーをスタッドボルトで固定した部分補修を施していたが、全ての杭で早期の段階で変状が確認され、最終的にはFRPカバーが破損・脱落した。写真-5.14はNo.31杭の部分補修部の破損状況であり、30年経過時の調査の際には鋼面に積層錆が確認されている。

表-5.7は、各杭で計測された20年経過時のサンプル採取部端部からの接着劣化進展距離の最大値である。接着劣化進展距離は、サンプル採取前に金尺を差し込んで計測し、さらにサンプル採取後に、写真-5.13のように錆の侵入による変色部分に対しても計測し、金尺の差し込みで計測した値と違いがないことを確認した。接着劣化が20年経過以降の10年間で進展したと仮定すると、接着劣化は、最大で年間約0.7~1.8cmの割合で進行する可能性があることが推察される。既往のポリエチレン被覆及びウレタンエラストマー被覆による重防食鋼矢板に関する研究³⁴⁾では接着劣化進展距離は年間0.3~1.5cmという結果となっている。今回の劣化進展距離は、既往の重防食鋼

矢板の結果と同等あるいはそれを上回る数値であり、波崎観測栈橋の厳しい条件が影響している可能性もある。

これらのことから、20年経過時の調査の際のサンプル採取部が鋼面まで露出した人工的な疵部となり、その疵部の端部からの接着劣化が影響し、図-5.7に示す鋼材板厚の減少につながったものと推察される。接着劣化によって直ちに鋼材の減肉が大きく進展するわけではないが、鋼面が露出した疵部と疵部周囲の劣化の進展は、維持管理の上で重要な調査・点検項目になるといえる。

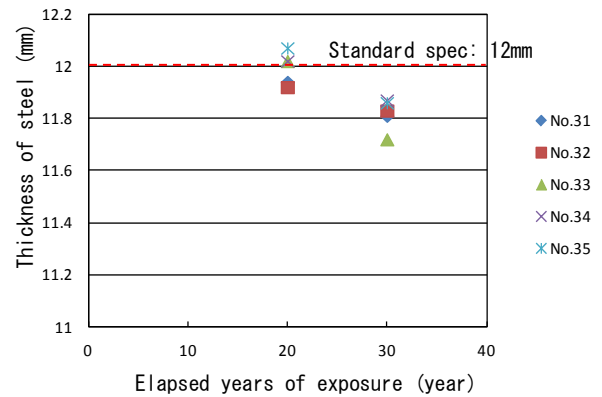


図-5.7 サンプル採取部における鋼管杭の板厚経時変化

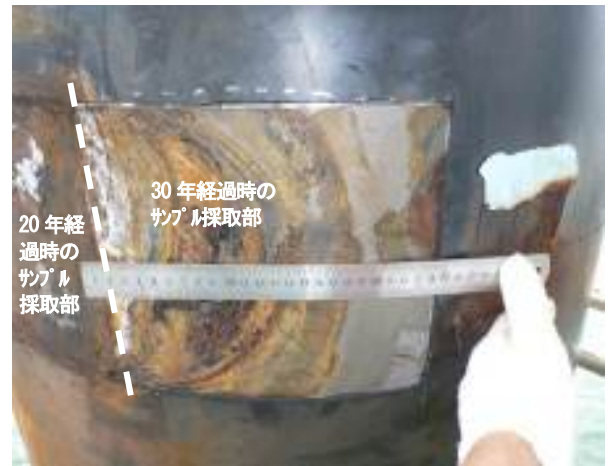


写真-5.13 No.31杭の30年経過時の調査の被膜採取箇所部での接着劣化進展距離測定状況



写真-5.14 No.31杭の20年経過時の調査のサンプル採取部に施した部分補修の破損状況

表-5.7 接着劣化進展距離

No	接着劣化進展距離の最大値	備考
31	15cm	20年経過時のサンプル採取部に積層錆
32	7cm	
33	15cm	
34	12cm	
35	18cm	

(6) 打音検査結果

打音検査では、表-5.8に示すように、人工的な疵部近傍で鋼面から被膜が明らかに浮いている箇所のみ（人工的な疵部から最大で約2cmの範囲）の検出に留まり、圧接状態で剥離している場所の特定までには至らず、表-5.7に示す範囲の被覆の接着劣化までは確認できなかった。圧接状態で接着劣化している場所の特定には、打音検査時に波形を記録する、あるいは超音波を直接当てて波形を検出する等の精密性が必要があることがうかがえた。

表-5.8 打音検査結果

No	打音検査で検出された被覆の浮きの範囲（人工的な疵部から距離）
31	0～2cm
32	0～2cm
33	0～2cm
34	0～2cm
35	0～2cm

(7) ポリエチレン被膜のサンプル採取による評価

1) 引張強度

図-5.8に示すように、30年経過時においてポリエチレン被膜の引張破断強度は製品仕様の12.0N/mm²（図中に破線で表示）以上を満たしていた。また、図-5.9に示すように、引張破断時の伸びも30年経過時においても製品仕様の300%（図中に破線で表示）以上を満たしていた。

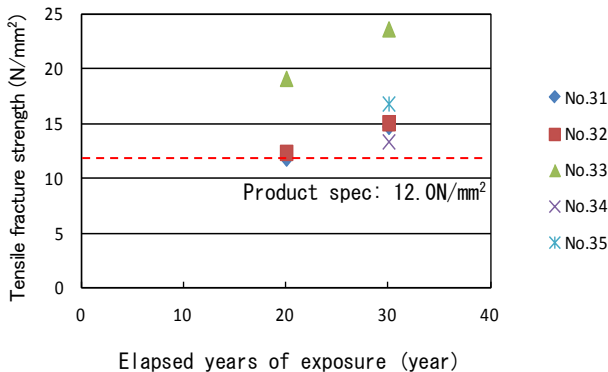


図-5.8 引張破断強度の経時変化

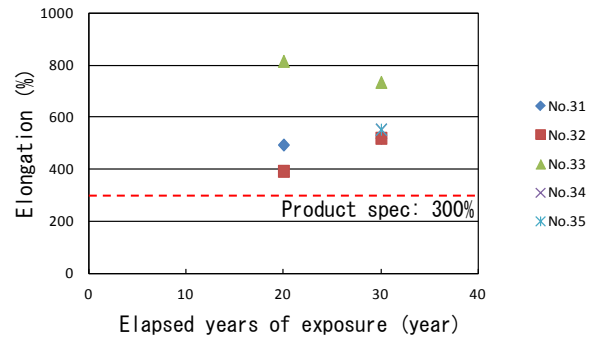


図-5.9 引張破断伸びの経時変化

2) 室内試験による体積固有抵抗

図-5.10に示すように、ポリエチレン被膜の体積固有抵抗は30年経過時において、製品仕様10¹²Ω・cm（図中の上側の破線）に近似するまで減少している。

一方で、被覆の絶縁抵抗は10⁸Ω・cm²以上の場合には被覆下の鋼は腐食していないと報告されていること⁵⁾、5.2(2)で述べたように今回の測定条件では絶縁抵抗は体積固有抵抗と被覆の厚みの積とみなせること、及び試験杭のポリエチレン被覆の厚みは図-5.6より0.3～0.7cmであることから、体積固有抵抗は1.4×10⁸Ω・cm (=10⁸Ω・cm²/0.7cm) 以上が防食性能の限界値の目安となる。図-5.10に示すように、30年経過時において、ポリエチレン被膜の体積固有抵抗は、防食性能の限界値（図中の下側の破線）までは低下していない。

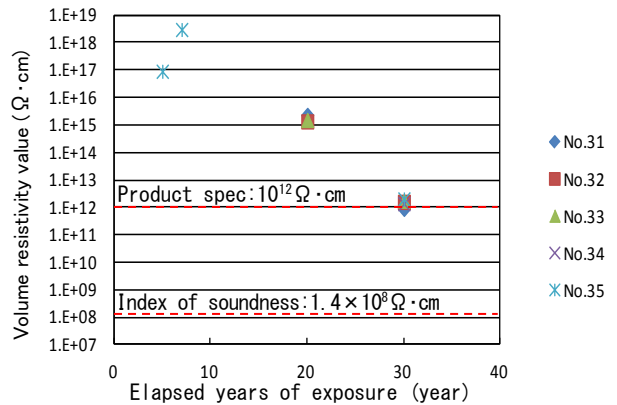


図-5.10 室内測定による体積固有抵抗の経時変化

3) 吸水率

図-5.11に示すように、ポリエチレン被膜の吸水率は30年経過時においてNo.31, 32は製品仕様の0.1%（図中に破線で表示）を満たしていた。吸水率を正確に測定するには、測定前に試験体表面に付着した水分を十分に除去することが重要となる。吸水率の測定値が低いNo.31, 32は水分除去が十分に実施できたものと推察されるが、他の杭に関してはサンプリング時に粗くなったポリエチレン

表面に入り込んだ水分等が十分に除去できなかった影響が現れている可能性がある。20年経過時においては、サンプリング材料の表面性状の良好なもの（水分を除去しやすいもの）のみを選んで測定したため、測定値にはバラツキはみられなかったものの、30年経過時においては、全杭に対して測定したため、水分残存の状況がばらつき、結果として測定値がばらついた可能性がある。

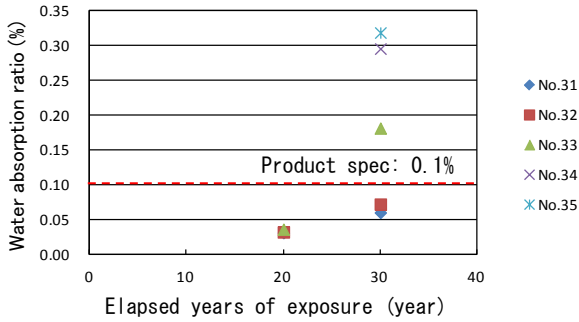


図-5.11 吸水率の経時変化

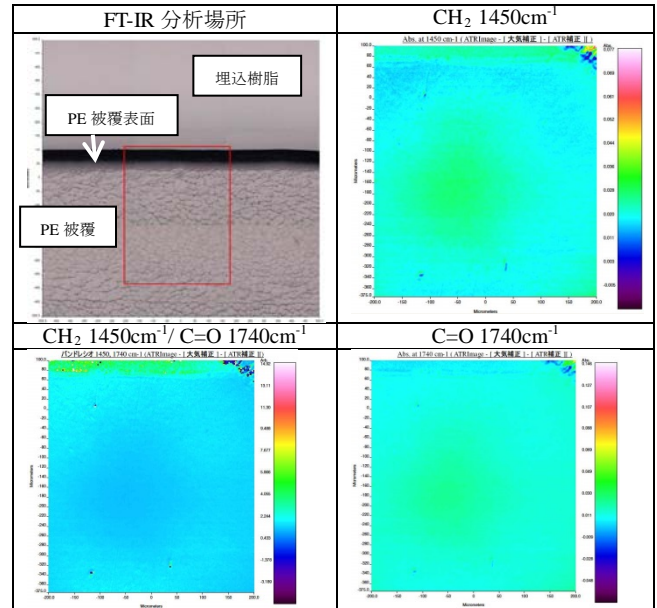


図-5.12 表面から400μm深さまでのFT-IR分析

4) 吸光度 (FT-IR分析)

ポリエチレン被膜の表面から400μm深さまでと、表面から2000~2400μm深さまでの2点について、微小領域FT-IR分析(CH₂ 1450cm⁻¹, C=O 1740cm⁻¹)を実施した。

①表面から400μm深さまで

図-5.12に測定結果を示す。CH₂及びC=Oの吸光度で中央付近が緑色になっているが、これは試験片の研磨の影響であり、この部分を除外すると、吸光度は以下のように評価される。

CH₂の吸光度：厚み方向で変わらず0.023程度

C=Oの吸光度：厚み方向で変わらず0.011程度

CH₂/C=Oの吸光度比：厚み方向で変わらず2.20程度

②表面から2000~2400μm深さ

図-5.13に測定結果を示す。C=Oの吸光度で中央付近が黄色から赤色になっているが、これは試験片の研磨の影響であり、この部分を除外すると、吸光度は以下のように評価される。

CH₂の吸光度：厚み方向で変わらず0.025程度

C=Oの吸光度：厚み方向で変わらず0.012程度

CH₂/C=Oの吸光度比：厚み方向で変わらず2.10程度

①, ②いずれもCH₂/C=Oの吸光度比は酸化劣化の指標とされる2以上²⁾で、紫外線劣化による酸化が抑制されているといえる。また、表面から400μm深さまでと、表面から2000~2400μm深さまでCH₂/C=Oの吸光度比がほぼ同等であることから、表層の紫外線劣化はほとんど進行していないものと判断できる。

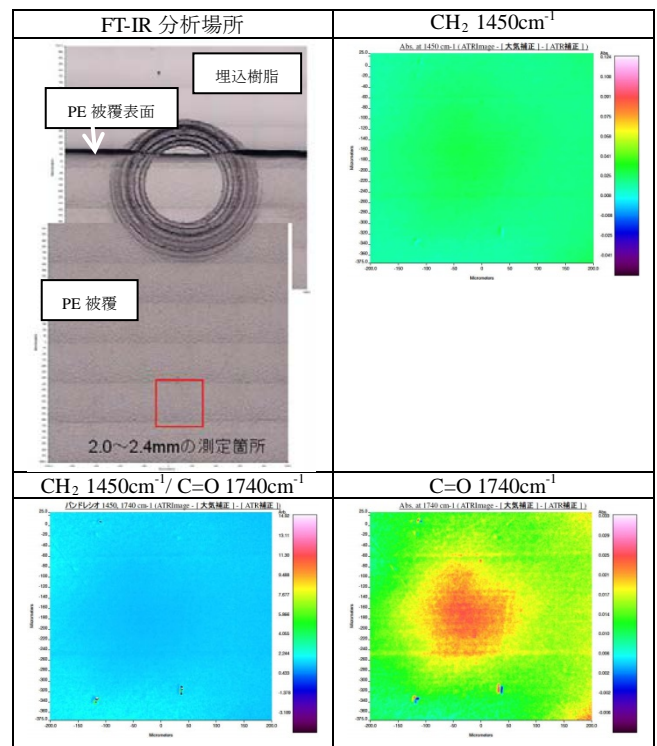


図-5.13 表面から2000~2400μmのFT-IR分析

5.4 防食性能評価及び性能低下予測手法に関する検討

(1) 防食性能評価

ポリエチレン被覆工法は30年経過時において、外観上は光沢率の低下と若干の変色が見られる程度であり、ポリエチレン被膜の体積固有抵抗、付着力、被膜厚み、機械的性質(引張強度, 伸び)に関しては製品仕様を満たし

ていた。また、体積固有抵抗の低下は見られるものの、防食機能が30年に亘り発現されていることがうかがえた。一方、人工的な疵部に関しては、疵部端部からのポリエチレン被膜の接着劣化と鋼材板厚減少が見られた。ポリエチレン被覆工法の維持管理においては、疵部の検出と疵部周辺の調査が重要であるといえる。

(2) 性能低下予測手法に関する検討

ポリエチレン被覆工法の劣化変状は紫外線による表層外観劣化と水分の吸湿による体積固有抵抗の低下が挙げられる。以下、30年経過時の調査結果に基づき、被膜の性能低下予測手法について考察する。

5.3(7)4)に示すFT-IR分析の結果から、紫外線劣化はほとんど進行していなかったことが判明している。このため、図-5.10で示される体積固有抵抗の経時の減少は、水分及び塩化物イオンの浸透の影響と考えられる。微細チョーキングを伴った水分浸透をFickの拡散浸透モデルを用いて時間の平方根に比例して浸透が進む⁹⁾と仮定した場合の関係を図-5.14に示す。ここで、図-5.10に示したように5年、7年、20年、30年の経過時の調査対象杭本数(杭No)は、それぞれ1本(No.35)、1本(No.35)、3本(No.31~33)、5本(No.31~35)であり、各杭で測定値のバラツキが少ないことから、調査杭本数が複数ある年は全杭の平均値を示すこととした。

図-5.14に示すように体積固有抵抗の経時変化を直線近似して、5.3(7)2)及び図-5.10に示した被膜性能の限界値の目安となる体積固有抵抗の値 $1.4 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ に到達する時間を求めると、約610,000hour(約70年)となった。ただし、この試算結果はある一例にすぎず、体積固有抵抗の初期値が低ければ限界値の目安に到達する予測時間は短くなることに注意しなければならない。一般的には、体積固有抵抗の初期値は、図-5.10に示した製品仕様に対して余裕をもった値となるが、定期的な計測を実施して初期値からの経時変化を把握することが重要である。

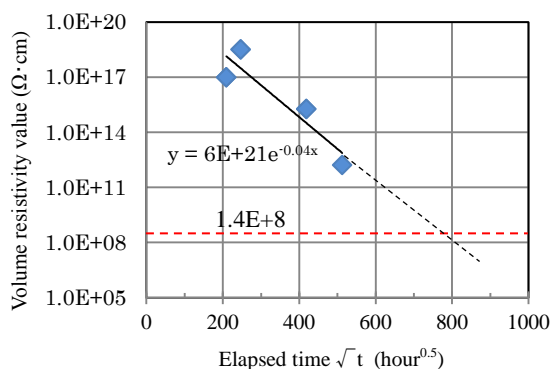


図-5.14 体積固有抵抗経時変化(片対数グラフ:Fickの拡散モデル)

また、被膜の疵等によって被膜厚が小さくなった場合は、体積固有抵抗は同じ値であっても絶縁抵抗は低下するため、防食機能が低下することにも注意が必要である。

5.5 補修工法に関する検討

ポリエチレン被覆工法は、30年に亘り防食効果を維持し、また被膜自体は劣化しづらく長期耐久性を有する可能性がある一方で、5.3(5)で示したように、鋼面が露出した疵部端部から接着劣化することが確認されている。ポリエチレン被覆工法においては、経時における被覆の疵部の有無と疵部端部及び被覆下端からの接着劣化等を点検・調査することが維持管理上、重要であり、さらに疵部を適切に補修する工法の確立が必要である。

表-5.9は各杭に試験的に適用した補修工法であり、以下に、鋼管杭を全周被覆して補修する全周被覆法と、より簡易な補修工法として疵部及び疵部周辺のみを部分的に補修する部分被覆法の検討について述べる。

5.5.1 全周被覆法

全周被覆法として1984年にNo.35杭に設置したシュリンクチューブ(収縮チューブ)の30年経過時の状況を写真-5.15に示すが、設置後翌年には密着不良が確認された。シュリンクチューブをポリエチレン被覆上に直接設置したため、ポリエチレン表面が滑りやすいことや、粘着材や溶着の不安定化の影響の可能性がある。写真-5.16はNo.35杭に設置した防食シート+FRPカバーの状況であり、FRPカバーの繊維の露出及び補修材の一部剥離が生じている。

これに対し、2012年より、写真-5.17に示すペトロラタムテープ+チタンカバー工法の溶接固定方式の試験を開始しており、3年経過時点では、異常は確認されなかった。当該工法は、カバー材にチタンを用いることで、FRPカバー工法の課題であった飛沫部における紫外線に起因した材料劣化を解決している。また、チタン薄板を巻き重ねることで補修部の外周にフィットしたまま抵抗溶接で固定することができ、滑りやすいポリエチレン表面への装着性の改善も期待できることから、長期防食補修工法としての評価が今後期待される。

5.5.2 部分被覆法

表-5.9に示す部分被覆法のうち、2004年に施したエポキシパテ(表面改質無し)については、設置後2年でパテの脱落が確認されている。エポキシパテは、鋼面が露出しないポリエチレン被覆部に直接設置しており、エポキシ樹脂の密着状態の影響の可能性がある。

また、5.3(5)で述べたように、ポリエチレン被膜のサンプル採取で鋼面が露出した人工的な疵部に対して施したペトラタム+FRPカバー（スタッドボルト固定）は、破損・脱落したため、2015年に、図-5.15(a)に示すポリエチレンの表面改質（火炎処理）を実施した後のエポキシ樹脂接着、及び図-5.15(b)に示すポリエチレンシートの熱溶着を試みた。これらは、ポリエチレンの表面には接着機能がないため、接着機能を付加させるための表面改質（火炎処理）や熱溶着等でポリエチレンシートを接着させる工夫を施したものである。

また、5.2(1)で述べた水中部に適用のポリエチレンシートの超音波溶着工法は、3年経過時で、写真-5.18に示すように、端部からのめくれが一部に確認されている。

表-5.9 ポリエチレン被覆工法現地補修部の変状

仕様	施工時期	現地補修部変状		
		経年	外観変状の特徴	
全周被覆法	シュリンクチューブ	1984	1年 密着不良を確認	
	防食シート+防食テープ	1985	1年 密着不良を確認	
	防食シート+防食テープ+ 下端PEバンド	1986	1年 PEバンド固定部以外は密着不良を確認	
	防食シート+防食テープ+ FRPカバー	1987	5年	浮遊物の衝突または波浪にてFRPカバーの1/2周が脱落(No.33杭),以降7年経過時で発錆確認,16年経過時で全損
			12年以降	ポリエステル樹脂のチョーキングにより繊維露出(No.31,32,34,35杭)
			26年以降	FRPカバーの損失確認(No.31,32,34,35杭)
ペトラタムテープ+チタンカバー	2012	3年	防食装置に異常は見られない →継続調査中	
部分被覆法	ペトラタム+FRPカバー(スタッドボルト固定) ※20年経過時の調査の際のカップリング採取部に適用	2004	3年	ペトラタムの端部のみ出しを確認
		5年		カバー下端固定金具の脱落
		8年		カバー損失、鋼面露出を確認
	エポキシパテ(表面改質無し)	2004	2年	パテの脱落を確認
	チタン薄板バンド固定	2014	1年	台風の波浪によりチタン薄板脱落
	ポリエチレン表面改質+エポキシ樹脂接着	2015		2016年より観察開始予定
ポリエチレンシート熱溶着	2015		2016年より観察開始予定	
水中部の部分被覆法	超音波溶着	2005	2年	ポリエチレンシートの脱落を確認(No.32,33,34杭)
		8年		ポリエチレンシートの脱落を確認(No.34杭)
	超音波溶着(溶着条件見直し)	2012	3年	ポリエチレンシート端部にめくれ発生、当該隙間に海生生物生成 →継続調査中

ポリエチレン被覆工法に関して、現状では簡易な部分補修工法が確立されていない。今後も追跡調査を継続し、飛沫帯及び水中部に適用したこれらの工法の有効性を評価していく予定である。



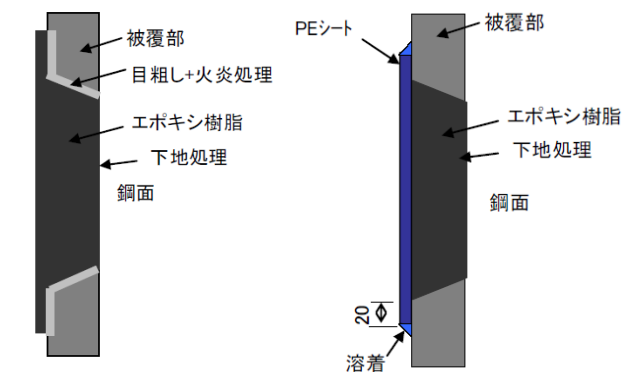
写真-5.15 No.35 杭のシュリンクチューブ補修試験部 (30年経過時)



写真-5.16 No.35 杭の補修試験部 (27年経過時)



写真-5.17 No.33 杭のペトラタムテープ+チタンカバー工法による全周補修 (3年経過時)



(a) 火炎処置による表面改質 (b) ポリエチレンシート熱溶着 + エポキシ樹脂充填
 図-5.15 部分補修



写真-5.18 No.34 杭の水中部の超音波溶着による補修部 (3年経過時)

5.6 まとめ

(1) まとめ

30年経過時の調査によって、ポリエチレン被覆工法の長期耐久性が確認されるとともに、鋼面まで達する疵部の影響が確認され、疵部の検出と疵部に対する補修対策が維持管理上重要であることがわかった。今回の調査で得られた結果をまとめ、以下に列記する。

1) 耐久性

ポリエチレン被覆工法は30年に亘り防食効果を維持しており、長期耐久性が確認された。

2) ポリエチレン被膜自体の耐久性

FT-IR試験結果より、紫外線劣化はほとんど観測されなかった。また絶縁抵抗は減少傾向にあるものの、防食性能に関しては問題ないレベルであった。これらの結果から、ポリエチレン被膜自体は長期に亘る耐久性を有する可能性があるかと推察される。

3) ポリエチレン被膜自体の防食性能評価方法

体積固有抵抗（絶縁抵抗）を劣化指標とした、防食性能の評価および劣化予測の可能性が示された。

4) 疵部の検出と疵部周辺の調査の重要性

鋼面まで達する人工的な疵部を起点として、被膜の接着劣化と鋼材板厚の減少が確認されたことから、ポリエチレン被覆工法の維持管理においては、疵部の検出と疵部周辺の調査が重要である。

(2) 今後の課題

1) 性能評価手法の検証

今回、劣化指標として、体積固有抵抗（絶縁抵抗）の適用可能性が示唆された。ただし、本測定手法については、5.2(2)及び5.3(2)で示したように、現地での測定は現状では容易ではない。より簡易かつ高精度な計測手法の確立が望まれる。なお、試料の採取が可能であれば、試料による計測も考えられる。

2) 簡易補修方法の確立

疵部の全周補修に加えて、簡易な補修方法としての部分補修の試験を開始しており、今後、追跡調査を通じての評価と工法の確立が課題である。

参考文献

- 1) 宮田義一・阿部正美・濱田秀則・清水一夫・中野啓眞・芥川博昭：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、2006.6.
- 2) 森北浩通・田中伸幸・畑千登・高木光司：カルボニル基分布によるポリエチレンの寿命予測、パナソニック電気技報、Vol.58、No.1、2010.3.
- 3) 原田佳幸・阿部正美・福手勤・濱田秀則・是永正・江田和彦・岩倉肇・元木卓也・佐藤一昌：重防食鋼矢板における被覆材の接着耐久性に関する研究、港湾技研資料 No.984、2001.3.
- 4) 審良善和・山路徹・岩波光保・原田典佳・吉崎信樹・村瀬正次・斎藤勲・上村隆之・北村卓也：重防食被覆を適用したハット形鋼矢板の耐久性に関する基礎的研究、港湾空港技術研究所資料、No.1230、2011.3.
- 5) R. Charles Bacon, Joseph J. Smith, and Frank M. Rugg : Electrolytic Resistance in Evaluating Protective Merit of Coatings on Metals, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 40, No. 1, 1948.
- 6) 久保内昌敏：耐食用有機材料の腐食劣化とその機構、第26回防錆防食技術発表大会 特別講演、2006.7.

6. ペトロラタム被覆工法

6.1 はじめに

ペトロラタム被覆工法は、ペトロラタム系防食材およびそれらを保護するカバーの組み合わせによる防食工法であり、多くの施工実績を有する信頼性の高い工法である。防食材として用いるペトロラタムは、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中心とするワックスである。製品としては、ペトロラタム（原料）に腐食抑制剤および充填剤等を加えたものが使用されており、ペースト状のものや不織布に含浸させたテープ状のものがある。これらの材料を、防食層として直接鋼材面に一定の厚さで被覆し、その外周を保護カバーで覆う。工法における機能は同じであるが、保護カバーには、材質と締結方法の組み合わせによって多くの種類がある。材質は一般に樹脂や耐食性金属が用いられ、耐食性金属製のボルトナットやリベットにより締結される。

本工法は、本研究の20年経過時の調査報告¹⁾や実構造物における施工実績に基づき期待耐用年数が概ね30年²⁾とされているが、使用されている部材の理論的な劣化機構やそれに伴う部材毎の変状連鎖がほとんど明らかになっていない。したがって劣化評価は外観目視観察による定性的な判定が主体となり、定量的な判定が難しいとされている。しかしながら、近年維持管理の重要性が広く認識されてきている中、本工法においても、従来の方法よりも高度且つ定量的な判断指標や知見の提示が要請されている。

20年経過時の調査報告¹⁾では、保護カバーの強度物性やペトロラタム系防食材の油分残存率に関し定量的なデータが報告されたが、今回の調査報告（30年経過）においては、前述のような技術的要請が高まっていることに鑑み、より多くのデータを収集・分析し、相関関係を調べることによる定量的な劣化評価を試みた。

6.2 調査内容

(1) 調査対象

表-6.1に調査対象を示す。調査対象はNo.3～29杭の8本である。ただし、No.12杭に関しては、適切なデータが得られなかったため、肉厚測定結果のみ示す。

(2) 調査位置

鋼管杭1本当たりの調査位置は以下の通りである（図-6.1参照）。

・高さ方向（3箇所）：+4.0m, +1.5m, +0.5m（各々、気中部、飛沫帯、海水中とみなす）

・水平方向（2箇所）：海側，陸側

したがって、杭1本当たりの調査位置は2×3=6箇所あるが、調査項目によっては、これより少ないものがある。

表-6.1 調査対象

杭No.	保護カバーおよび防食材の種類	経過年数
3	PE（中密度ポリエチレン t4.7mm） ペーストテープ+防食テープ	16年
13	PE（中密度ポリエチレン t4.7mm） ペーストテープ+防食テープ	27年
12	FRPP（繊維強化ポリプロピレン t2mm） 注）測定結果はない ペースト+ペトロラタムシート	30年
14	FRP（繊維強化不飽和ポリエステル t2mm） ペーストテープ+防食テープ	12年
19	FRP（繊維強化不飽和ポリエステル t2mm） ペーストテープ+ペトロラタムシート	19年
24	FRP（繊維強化不飽和ポリエステル t2mm） ペトロラタムシート	29年
6	TI（1種チタン t0.6mm） ペースト	29年
29	TI（1種チタン t0.6mm） ペースト+防食テープ	15年

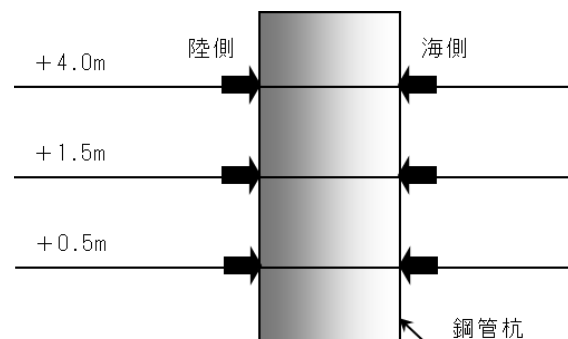


図-6.1 鋼管杭の調査位置

(3) 調査項目および測定・評価方法

表-6.2に調査項目および測定、評価方法を示す。本工法は種々の材料（部材）によって構成されるが、調査対象は、鋼材、ペトロラタム系防食材および保護カバーとした。

(4) 調査方法

・被覆材の一部をサンダーで30×30cm程度の大きさに切り出し、鋼材表面および防食材の状態を観察した。

・10×10cm四方内の鋼面（肉厚測定面）をサンダーで研磨し、5点の測定点を製作した後、超音波式肉厚測定器で肉厚を測定した（図-6.2参照）。

・表-6.2に示すように、回収したペトロラタム系防食材および保護カバーの各種分析を行った。それらの試験状況を写真-6.1、写真-6.2に示す。

表-6.2 調査項目

対象	項目	測定・評価方法
鋼材	鋼材表面目視	—
	鋼材肉厚	超音波式肉厚測定器
ペトロラタム系防食材	内部目視	—
	油分残存率	港湾鋼構造物実務ハンドブック ³⁾
	含水率	JIS A1476 (2006)
	絶縁抵抗	JIS Z1902 (2009)
	インピーダンス	(参考) 鋼橋塗膜調査マニュアル ⁴⁾
保護カバー	外観目視	—
	強度物性	JIS K7164 (2005) JIS K7017 (1999) JIS H4600 (2012)



写真-6.2 保護カバーの試験片と試験状況

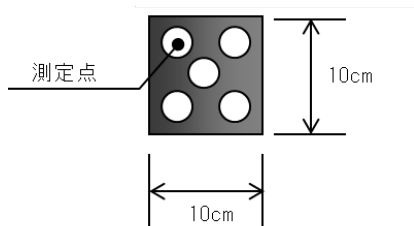


図-6.2 肉厚測定面

・インピーダンスは、既設の装置により毎年計測を行っているものである。高さ+5.0mおよび+3.5mの位置に設置されたセンサーを使用して、3種類の周波数(200/500/1000Hz)で測定した(図-6.3参照)。インピーダンス計測用センサーは、ペトロラタム系防食材(防食テープ)を挟み込むように設置されている。



写真-6.1 ペトロラタム系防食材の試験片と試験状況

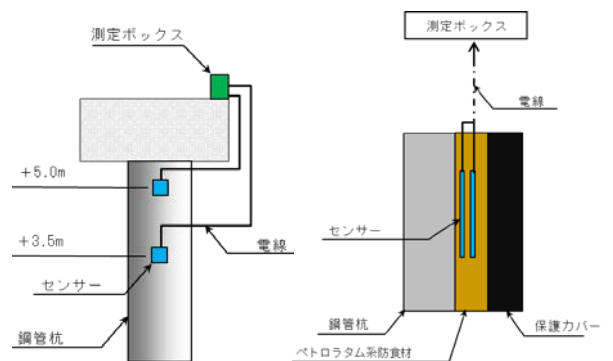


図-6.3 インピーダンスの測定要領

6.3 調査結果

(1) 鋼材

a) 鋼材表面目視

鋼材表面を目視した結果、No.12 杭の全体、No.13 杭の干満帯でのカバー継ぎ目相当部、No.19 杭の飛沫帯（写真-6.3 参照）、No.24 杭の干満帯と海中部に赤橙色またはそれに近い色の活性な錆が確認された。これ以外（No.3, 6, 14, 24, 29）の杭に関しては、施工時の発錆状況は不明であるものの、化学的に不活性な黒色の錆が見られた。



写真-6.3 鋼材の発錆状況 (No.19 杭)

b) 鋼材肉厚

肉厚測定結果を表-6.3に示す。表中、網掛けしてあるデータは活性な錆が認められた部位である。

表-6.3 肉厚測定結果

杭番号		3	6	12	13	14	19	24	29	
経過年数		16年	29年	30年	27年	12年	19年	29年	15年	
肉厚 (mm)	初期値	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	
	陸側	+4.0m	8.4	10.7	11.7	12.2	12.4	18.5	11.5	9.7
		+1.5m	-	13.8	11.5	12.3	12.6	11.6	11.2	8.2
		+0.5m	-	-	11.5	11.0	11.9	11.8	6.8	-
	海側	+4.0m	7.7	10.2	11.9	12.3	12.6	18.5	11.4	7.9
		+1.5m	-	14.3	11.6	12.1	12.6	11.4	11.3	8.6
		+0.5m	-	-	11.7	12.1	11.9	11.7	6.9	-

(2) ペトロラタム系防食材

a) 内部目視

No.3とNo.29杭の2本では防食材の変状は見られなかった。また、No.6, 13, 14, 19, 24杭の5本では防食材が明るい茶色から黒褐色へ変色（写真-6.4参照）していたが、No.6, 13杭では一部固化している状態も認められた。ただしNo.6は上端部シール不備、No.13はカバー継ぎ目部による影響を受けたものと推測される。

b) 油分残存率

油分残存率の測定結果を図-6.4に示す。外枠が太線の棒グラフは活性な錆が認められた箇所を表す。経過年数が各杭で異なるが（表-6.3参照）、油分残存率の測定結果は62.9～98.6%の範囲となった（100%超の値は除く）。但

し、No.12, 24杭に関しては、現在の一般的な防食仕様であるペトロラタム系防食ペースト+防食テープの組み合わせではなく、ペーストタイプの材料のみを使用している。したがって、現状の分析方法による評価が困難であると判断し、結果から除外した。

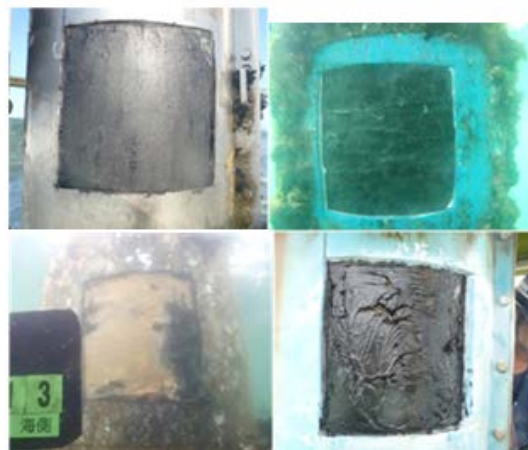


写真-6.4 ペトロラタム系防食材の変色状況 (例)

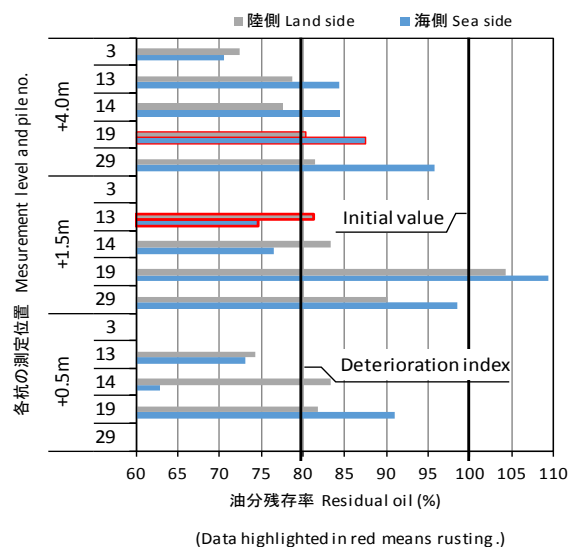


図-6.4 ペトロラタム系防食材の油分残存率

c) 含水率・絶縁抵抗

含水率および絶縁抵抗の測定結果を図-6.5, 図-6.6に示す。外枠が太線の棒グラフは活性な錆が認められた箇所を表す。含水率が0.5～16.0%、絶縁抵抗が0.1～6623.3 MΩ・m²と、広いレンジでの値が得られた。

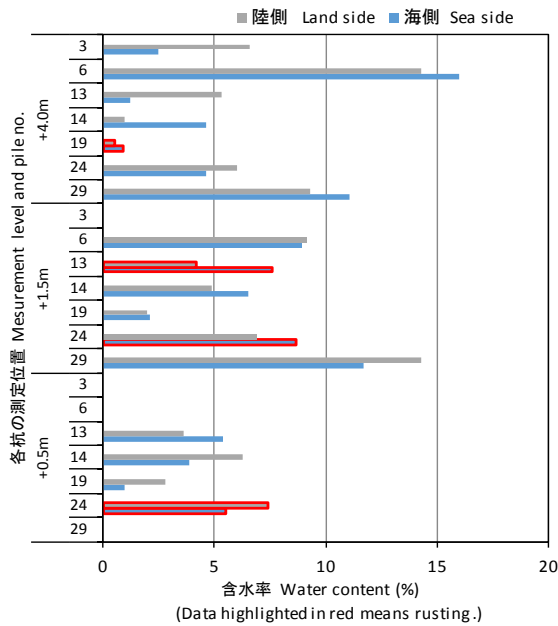


図-6.5 ペトロラタム系防食材の含水率

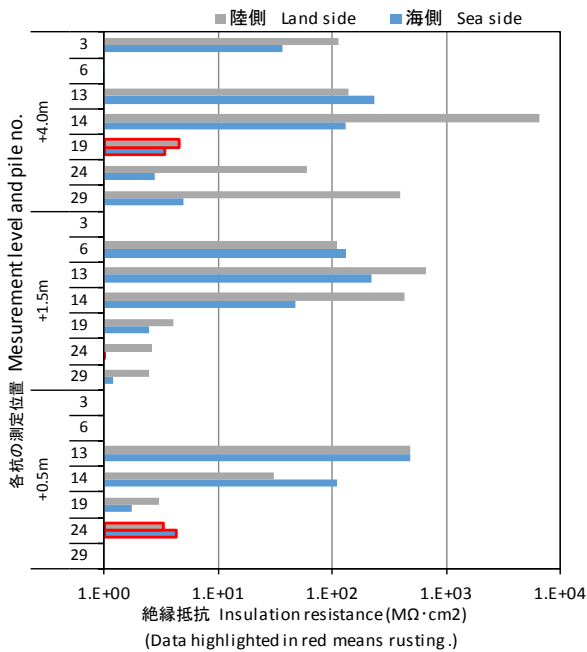


図-6.6 ペトロラタム系防食材の絶縁抵抗

(3) 保護カバー

a) 外観目視

各杭とも大きな損傷・劣化は見られないが、①端部シール部分やカバーの継ぎ目におけるさび汁の滲出、②保護カバー表面の白亜化や退色・変色等の軽微な劣化が認められた。主な保護カバー（PE, FRP, TI）の外観を写真-6.5に示す。



写真-6.5 主な保護カバーの外観

b) 強度物性

樹脂製カバーの強度物性試験（引張、曲げ）の結果を図-6.7～図-6.10に示す。なお、初期値は、一般的に使われている代表値⁹⁾を採用しているが、メーカーが分かっている場合にはその代表値を採用し、評価しているデータもある（No.14杭：引張強度90MPa、曲げ強度180MPa）。

ポリエチレンカバーの引張強度は17～19MPa、曲げ強度が34～40MPaであった。一方、FRPは引張強度が47～98MPa、曲げ強度が104～190MPaであった。

次に、耐食性金属であるチタン製カバーの強度物性試験結果を図-6.11～図-6.13に示す。その際、カバーの周および長さの方向パラメータを追加し試験を行った。その結果、引張強度が320～353MPa、0.2%耐力が188～245MPa、破断伸び率が39～49%という値が得られた。

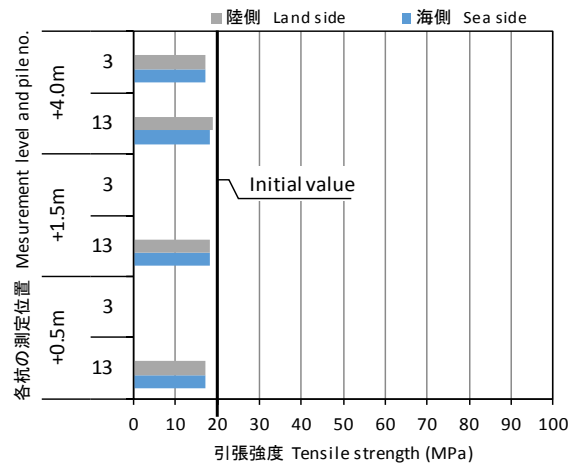


図-6.7 ポリエチレンカバーの引張強度

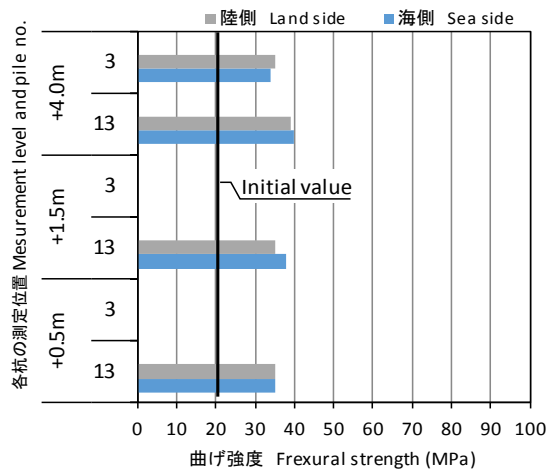


図-6.8 ポリエチレンカバーの曲げ強度

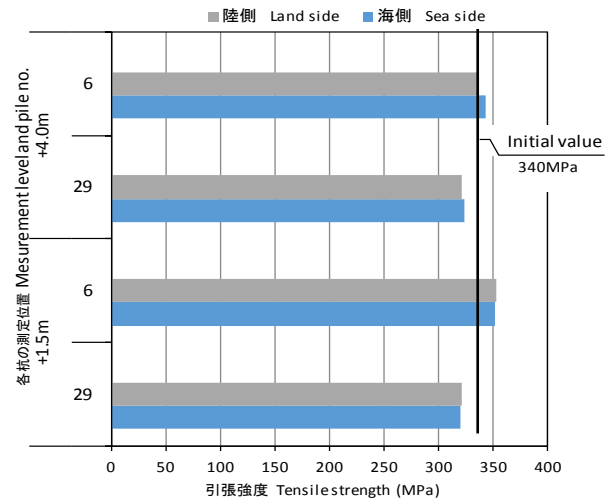


図-6.11 チタンカバーの引張強度

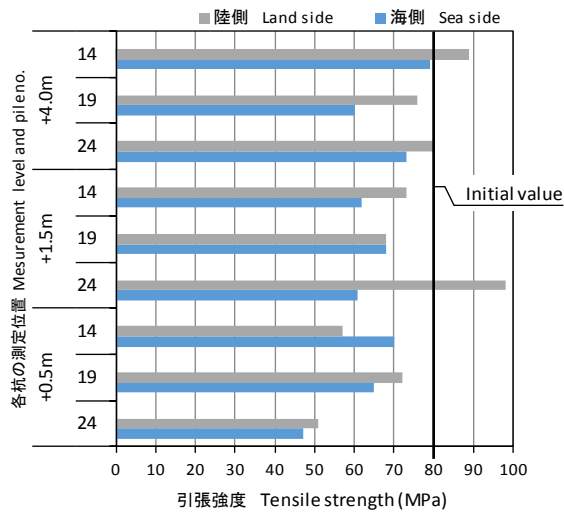


図-6.9 FRPカバーの引張強度

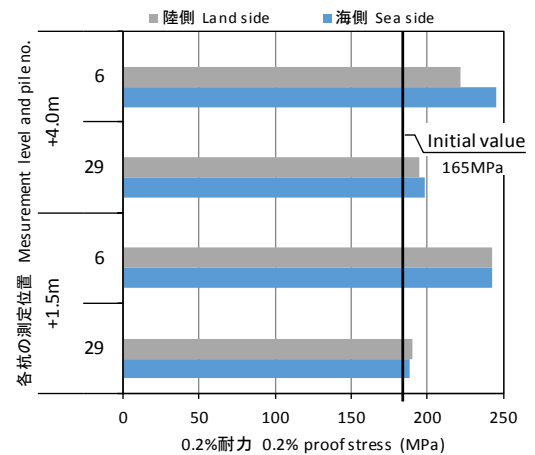


図-6.12 チタンカバーの0.2%耐力

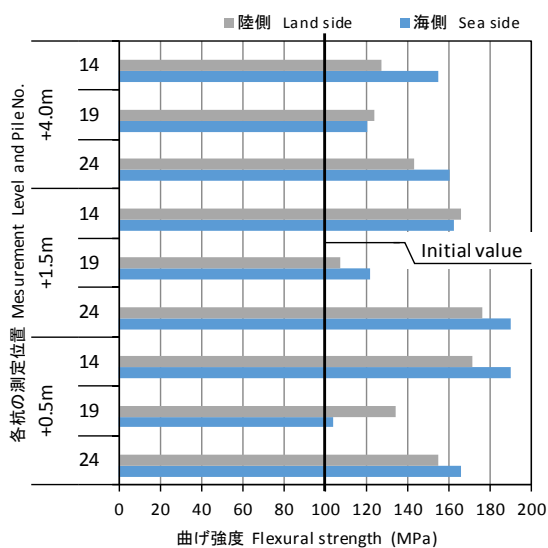


図-6.10 FRPカバーの曲げ強度

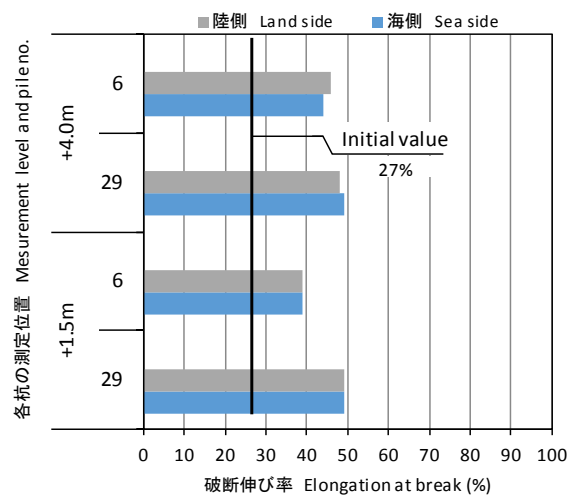


図-6.13 チタンカバーの破断伸び率

c) 電気化学的測定

図-6.14, 図-6.15に, No.3, No.13杭におけるインピーダンス (抵抗, 静電容量, $\tan \delta$ の各パラメータ) の経年変化を示す. 測定位置は何れの杭も+3.5mおよび+5.0mの高さである.

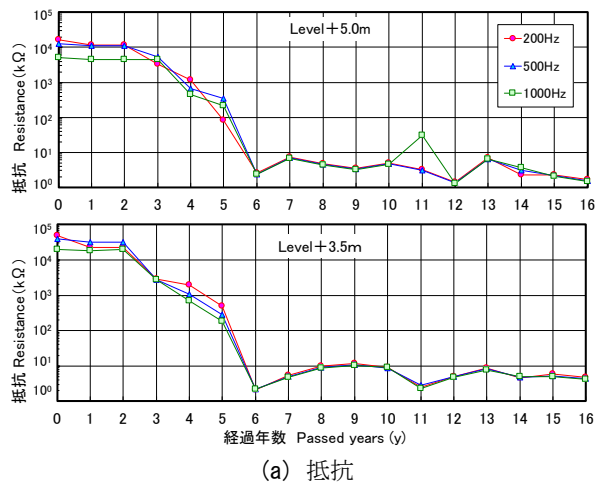


図-6.14 インピーダンスの経年変化 (No.3杭)

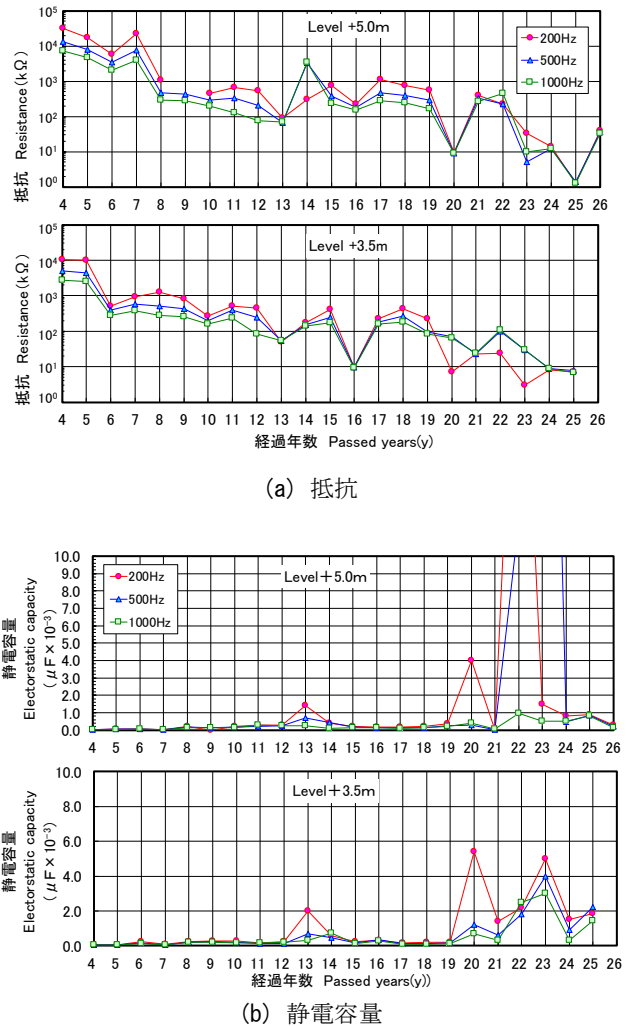


図-6.15 インピーダンスの経年変化 (No.13杭)

6.4 防食性能評価及び性能低下予測に関する検討

(1) 鋼材

鋼材の肉厚は、防食期間および無防食期間に関する履歴が不明である杭が多いため、定量的な評価が困難である。したがって、今回は考察に用いないこととした。但し、発錆状況については、No.12, 13, 19, 24杭（樹脂製カバー使用）において活性な錆が認められたことを踏まえ、ペトロラタム系防食材および保護カバー特性との相関性に関し次項以降で適宜述べる。

(2) ペトロラタム系防食材

a) 油分残存率

ペトロラタム系防食材の劣化機構は未だ十分に解明されていないが、大凡のイメージとして、環境により化学成分が変化したり、シール部の劣化箇所等の微細な隙間から徐々に油分が失われていく劣化機構が考えられている。

その中で、油分残存率は防食性能の劣化判定の有効な指標として考えられており、前回調査では18年経過した杭（No.14, 22杭；樹脂製カバー使用）で85.9～96.7%の値（全て85%以上）を示し、鋼材に錆が生じていなかったことが報告されている¹⁾。そしてこの結果に基づき、防食効果の良否を判定する劣化指標として80%の油分残存率が示されている⁵⁾。それに対し今回の結果は62.9～98.6%となり、データが得られた5本の杭の内訳を見ると、

- ①No.14杭：62.9～84.3%（12年経過）
- ②No.3, 19, 29杭：70.5～98.6%（15～19年経過）
- ③No.13杭：73.1～84.3%（27年経過）

となった。前回調査時（18年経過）と比べ、60～70%程度の値を示す結果が増えた。これらの結果から、長期間の自然環境における暴露により、ペトロラタム系防食材から数十%以上の油分が徐々に消耗していくと考えてもよさそうである。しかし、①サンプリングおよび分析過程で含まれる誤差、②設定された初期値による誤差、③保護カバーの仕様、④サンプル数の不足等による影響も大きいと考えられるため、より性能評価の精度を高めるには、慎重な議論が必要である。

なお、図-6.16に油分残存率と経過年数の関係をプロットしてみたが、時間とともに油分残存率が減少するといった傾向は明確ではなかった。この理由としては、前記のような誤差要因が含まれていることが考えられる。

一方、No.19杭の+1.5mの位置において100%を超える分析結果が得られた。他の結果より、ほぼ初期値に近い値を保持できるとは考え難く、海上大気部の範囲が高温となり、垂下して+1.5m付近で滞留したものと推測される。但し、このような傾向を示しているのがこの杭だけなの

で、このような現象の妥当性の評価も今後重要な検討課題である。

今回の調査では各データの位置的な傾向が把握できるかということを確認することも大きなテーマである。当然、サンプリングする位置（高さ、向き）により水分や温度等の自然環境が異なり、多少でも何らかの傾向が見られることを想定していた。しかし図-6.4に示したように、明確な傾向が認められなかった。

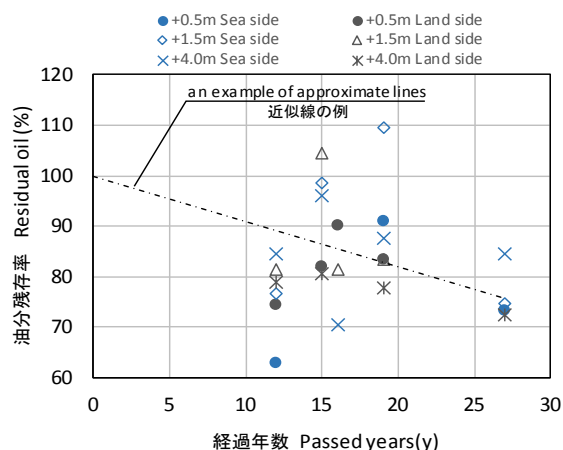


図-6.16 経過年数と油分残存率

b) 油分残存率と発錆の相関性

油分残存率と鋼材の発錆との相関は、No.13杭（+1.5m）あるいはNo.19杭（+4.0m）を他の発錆していない杭と比較したが、有意な傾向は確認できなかった。No.13, 19杭では油分残存率が80%以上もしくはそれに近い値を示している。またNo.13杭では、油分残存率が80%を下回るものの、絶縁抵抗が製品規格の $10^2 \text{M}\Omega \cdot \text{m}^2$ 以上あり、No.19杭では油分残存率が80%以上、含水率も3%以下であった。

このように他の杭より物的に良好な結果を示しているにも関わらず発錆が確認されているということは、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。例えば、材料の垂下による重量変動や材料界面での海水浸透のようなペトロラタム材料単体の性能低下以外の因子による原因が挙げられる。

一方、表-6.4に示すように油分残存率が80%未満（9箇所）であっても、発錆が認められなかった箇所は全体の89%（=8/9箇所）であった。一方、油分残存率が80%以上の場合、発錆が認められなかった箇所は全体の80%（=12/15箇所）であった。両者の結果には有意な差が認められないため、これらの相反する現象を説明できるような検証が今後必要である。

表-6.4 油分残存率による発錆有無の割合

油分残存率	発錆の有無		割合 ②/①
	データ数 ①	データ数 ②	
80%以上	あり	3	20%
	なし	12	80%
80%未満	あり	1	11%
	なし	8	89%

c) 油分残存率と含水率・絶縁抵抗の相関

今回の調査では、油分残存率に加え含水率および絶縁抵抗を測定した。これらの値は油分残存率と何らかの相関性があり、防食材の劣化および鋼材の腐食機構を示すパラメータになると考えられる。図-6.17～図-6.19に油分残存率、含水率および絶縁抵抗の相関関係を示す。図-6.17では、含水率が増えると絶縁抵抗が小さくなるという一般的に予想される傾向を示していると考えられる。一方、図-6.18および図-6.19に示す油分残存率との相関関係は、明確な傾向が認められない。

d) 電気化学的測定

図-6.14 および図-6.15 のインピーダンス測定結果において、No.3 杭は 6 年経過時に各値が大きく変化し、No.13 杭については経過 20 年前後から徐々に変化し始めている。何れも抵抗が減少し、静電容量およびイオン透過性の尺度である $\tan \delta$ が増加していることから、この頃に水分の侵入による影響が顕著になり始めた可能性がある。

6.4(2) a)～c) 項の結果からは劣化状況および劣化機構の把握が困難であるが、インピーダンス測定の結果は経年に伴う防食材の劣化に伴う電気化学的な変化を示すものであると考えられる。また、No.13 杭では活性な錆が認められたことから、防食材の劣化が腐食の発生に関与していることを示唆するものであると考えられる。

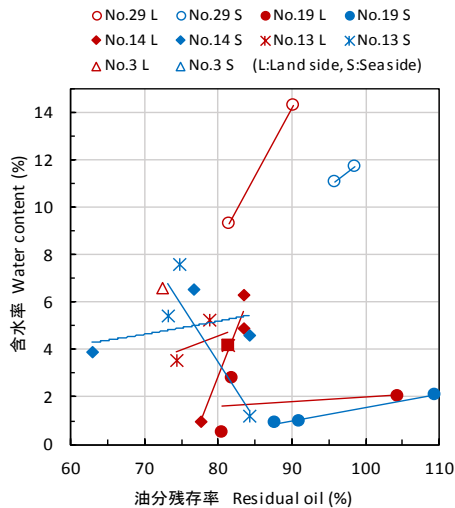


図-6.17 含水率と絶縁抵抗の関係

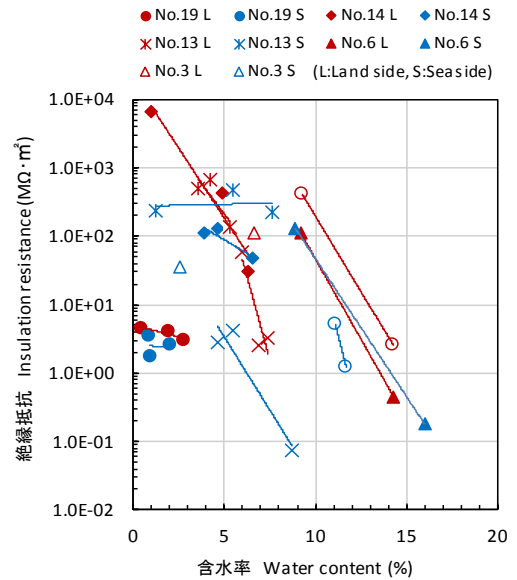


図-6.18 油分残存率と含水率の関係

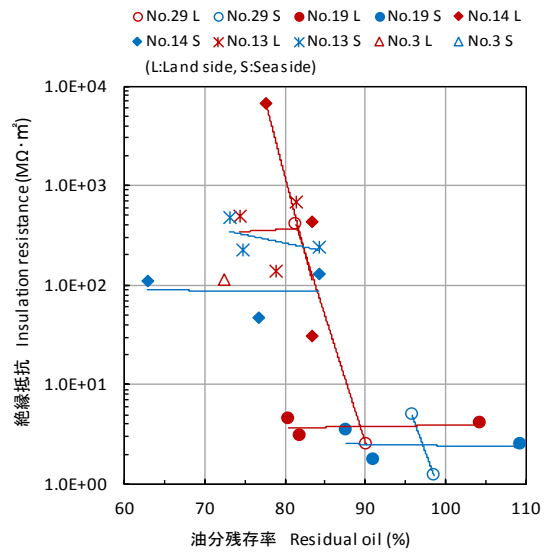


図-6.19 油分残存率と絶縁抵抗の関係

(3) 保護カバー

保護カバーは、中長期の耐久性を有すると考えられる材質のものを予め選定しているため、大きな外力が絶え間なく加わる等の想定外の環境に曝されない限り、長期間にわたって劣化の程度は小さいと考えられる。保護カバーの劣化指標としては、一般点検で実施されるような外観目視ではカバー材の内質を推測することが困難であるため、強度物性の変化を測定することが有効であると考えられている。以下、各カバー毎に考察を行う。

a) ポリエチレン (PE) カバー

PEカバー (No.3, 13杭) の引張強度保持率を図-6.20に、曲げ強度保持率を図-6.21に示す。PEカバー強度の初期値は10~20MPaとされているが、初期値を20MPaとしても、概ね80%以上の強度を保持しており、劣化の程度が小さいことが窺える。また、サンプリング位置による傾向をみると、やや海側および海水に近い部位の強度保持率がやや低下している傾向が窺える。一方、カバーの劣化が小さいにも関わらず内部に錆が発生している状態に関しては、カバーの劣化が要因とは考え難い。理由としてはカバーの継ぎ目付近に当たる部位であることから、波力等の外力が作用した際に発生したカバーのずれや緩みによって内部に腐食因子が侵入した可能性が考えられる。

b) FRPカバー

FRPカバー (No.14, 19, 24杭) の引張強度保持率を図-6.22に、曲げ強度保持率を図-6.23に示す。FRPカバー強度の初期値は、引張強度が80MPa以上、曲げ強度が100MPa以上とされている。引張強度は全体的に初期値よりも低下している傾向が認められ、引張強度保持率のデータの94%以上は60%以上の保持率を示し、最小値は59%であった。また引張強度の位置的な傾向は、やや海側および海水に近い部位の強度保持率がやや低下しているような傾向が認められる。理由としては、水分の多い環境にあるため、加水分解による樹脂の劣化が気中に比し、より促進されるためと推測される。一方、曲げ強度に関しては、全て初期値以上の強度を保持しているが、ばらつきが大きい傾向の把握ができなかった。

なお、保護カバーの強度特性は、耐衝撃性と耐形状維持性に寄与していると考えられるが、耐衝撃性に関しては25年間海洋暴露されたFRPカバーの衝撃試験を実施した事例において初期の耐衝撃性の2/3に低下するとの報告がある⁷⁾。この現象は、衝撃痕において局部的な深絞りによる引張作用が発生することが原因であるとされている。今回認められた引張強度の低下は、この事例と同様に、砕波による強い衝撃力を受ける波崎の海洋環境によって促進されたと考えられる。

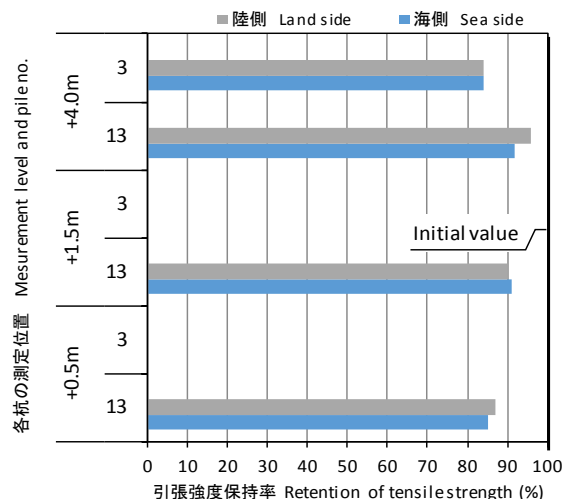


図-6.20 PE カバーの引張強度保持率

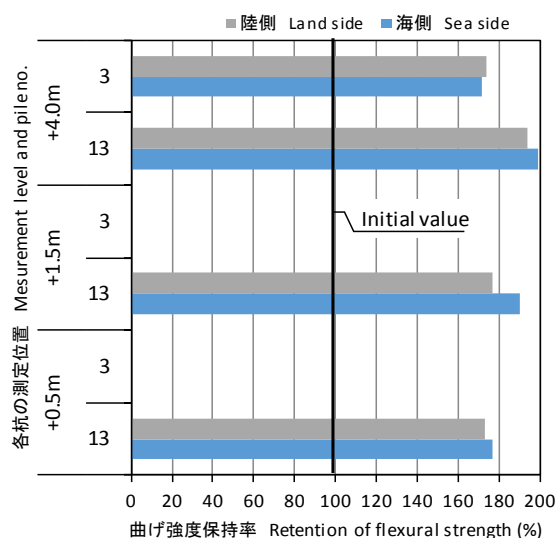


図-6.21 PEカバー曲げ強度保持率

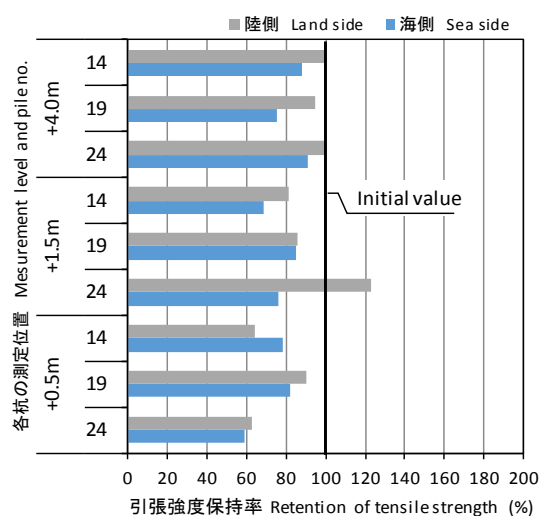


図-6.22 FRPカバーの引張強度保持率

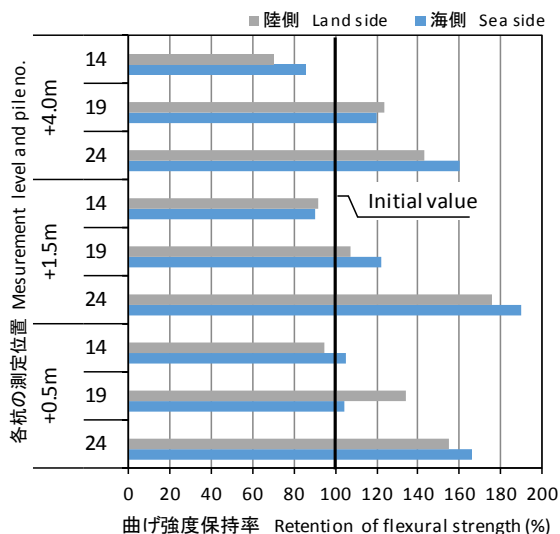


図-6.23 FRPカバーの曲げ強度保持率

c) チタンカバー

前回調査時¹⁾と同様に、表面における若干の変色が認められるものの、強度物性の測定結果を以下に示す初期値 (JIS H 4600) と比較してみると、

- ・引張強度：270～410MPa (平均値340MPaとする)
- ・0.2%耐力：165MPa以上
- ・破断伸び率：27%以上

引張力で初期値を340MPaとして考えた場合、強度保持率は最低でも90%程度の値を示す。また、0.2%耐力および破断伸び率も初期値以上の値を示しており、これらはJIS規格を満たしている。この結果から、耐食性金属であるチタンカバーは樹脂カバーに比べ、より長期の耐久性を有するといわれていることが窺える。

(4) 調査における留意点

性能評価のために今回実施した各調査の本結果は、誤差の影響が少なくないと考えられる。今後の検討に向け、分析精度の一層の向上を図る必要があるが、その留意点を挙げる。

a) 各部材の初期値の設定

カバーの強度特性に関して、例えば曲げ強度保持率の結果に100%を超える値が見られたように、製造時のデータが不明であるため、材料の初期値を代表的な値で設定すると、誤った評価をしてしまう。特にFRPは、材料組成による製品の著しいバラツキが生じることがあるため、それに伴い強度物性への影響も大きくなる。そのため、初期値を記録・保存しておく必要がある。

b) サンプルング方法

サンプルングは、ある一定の大きさの部材を切り出しで行うが、特にペトロラタム系防食材は素材が不織布で

あることから、切り出しの際に伸びて面積が変化してしまうことがある。また、防食材の一部を採取し損ね、鋼面に付着したまま残置されることもある。

c) データの精度向上とその対策

性能評価を行う上で、実際には現場での対応が難しい面 (特に水中における作業) があることを認識し、そのための対策を事前に立案しておくことが望ましい。例えば初期値が無い場合は、予め検量線 (例：厚さ-強度物性) を準備しておくことも対策の一つであろう。

6.6 まとめ

(1) まとめ

ペトロラタム被覆工法について、30年にわたる調査により以下の結果が得られた。

- 1) 鋼材の腐食に最も大きな影響を及ぼすと考えられているペトロラタム系防食材の油分残存率は、12～27年経過した時点において60～90%程度の範囲であった。但し、本結果では経過年数と油分残存率の間に明確な相関関係は見られなかった。
- 2) 油分残存率と相関があると考えられる、腐食傾向、含水率、絶縁抵抗および電気化学的測定については、明確な相関が得られなかった。しかし、腐食機構や材料の劣化機構の解明等、より高度な研究を今後行っていくに当たって、これらの結果を、基礎的な知見として活用することができると考えられる。
- 3) 保護カバーは内部のペトロラタム系防食材の保護に有効であると考えられるが、経年変化 (劣化) が進行していると考えられる。また、樹脂製カバーと耐食性金属カバーを比較すると前者の劣化程度が大きいと考えられる。
- 4) 概ね30年程度経過しているNo.12, 13, 19, 24杭の鋼材表面の状態は、発錆が認められたものの著しい腐食は発生していなかった。また、ペトロラタム系防食材、保護カバーの物性試験結果及び現地における外観目視結果は各部材による環境遮断機能が30年程度経過しても有効であることを示唆するものであった。

(2) 今後の課題

ペトロラタム被覆工法の防食性能評価、劣化評価および耐久性評価に関する今後の課題を以下に述べる。

本工法の各評価をより適切に行うには、時間の経過と共に材料に生じる変化と、それと共に発生する腐食の状態を関連付けて定量的に把握できる方法を見出さなければならない。また、その際にそれらの変化がどの程度の

速さで進行していくかを予測できることが必要である。

しかしながら、主要部材である、ペトロラタム（石油ワックスの一種）と腐食抑制剤の混合物であるペトロラタム系防食材はその防食・劣化機構がほとんど明らかにされていない。防食機構に関する一般的な見解としては、①環境遮断性を向上させる機能をもつ、②含まれている化学成分により鋼材の表面に保護（防食）被膜を生じさせる、というものであるが、これらを詳しく研究した報告は皆無といってよい。また、劣化機構については、加温の影響、海水や酸素雰囲気への接触等の周辺環境が劣化因子として考えられるが、これらの因子が劣化過程に及ぼす影響はよくわかっていない。

一方、防食材を保護する役割を担っている保護カバーについても、同じ主要な部材でありながら、その役割を詳しく研究した例や劣化機構についての知見は少ない。つまり、現状では材料に関する多くの情報が無いため、冒頭の目的を達成するためには、今後、波崎での現地調査を継続的に続けていきながら、同時に以下の基礎的な研究を行っていく必要がある。

- 1) 材料の機能と役割を理論的な面から明確化させる。
- 2) 理論を裏付けるための試験を実施する。
- 3) 材料の機能性低下（劣化）と鋼材の腐食との関係を確認する。
- 4) 試験・分析方法を確立する。

これらは時間のかかる作業であるが、地道に検証していくことが最終的な成果への早道であると考え。また、これらの成果を得ると同時に実環境試験との整合性を確認していくことが重要である。

参考文献

- 1) 宮田義一・阿部正美・濱田秀則・清水一夫・中野啓眞・芥川博昭：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.
- 2) （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）、p.59, 2009.
- 3) 防食・補修工法研究会：港湾鋼構造物 新しい防食工法・補修工法・維持管理 実務ハンドブック 付録編、pp.付61-63, 2013.
- 4) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼橋塗膜調査マニュアル JSS IV03-1993, pp.36-39, 1993.
- 5) 文献2, p.249, 2009.
- 6) 防食・補修工法研究会：港湾鋼構造物 新しい防食工法・補修工法・維持管理 実務ハンドブック 設計・施工編、pp.4・8-13, 2013.
- 7) 齊所広之・今福健一郎・坂本宏司・木下和宏：ペトロ

ラタム被覆工法におけるチタンカバーとFRPカバーの耐衝撃性の比較、土木学会年次学術講演会講演概要集、第66巻、I-598号、pp.1196, 2011.

7. 無機被覆工法

無機被覆工法は、セメントモルタルや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。

ここでは、コンクリート被覆工法及びモルタル被覆工法を対象とし、調査を行った。

7.1 コンクリート被覆工法

7.1.1 はじめに

コンクリート被覆工法は、被防食体である鋼管杭などを鉄筋コンクリートで被覆し、セメントコンクリートの持つ強いアルカリ性によりセメントコンクリート内部の鋼材表面に形成される緻密な不動態被膜で、鋼材面を腐食作用から保護することを特徴とする被覆防食工法である。

本試験に適用したコンクリート被覆工法は、鋼管杭などの被防食体である鋼材と防食被覆層である鉄筋コンクリートを水中スタッド溶接で強固に一体化させた工法で、防食と補強を兼ねることのできる工法である。

20年および21年経過時（2004および2005年）の詳細調査においては、被覆コンクリートから採取したコアを用いて、コンクリートの物性値の測定、塩化物含有量試験などを行い、干満帯においてはコンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界値を超えていても内部鋼材の腐食に及ぼす影響が小さいことが示された¹⁾。

本工法については、実績は多いものの、実環境での長期耐久性の実態、劣化メカニズムおよび防食性能の評価手法・劣化予測手法については、未だ確立されていないのが現状である。

本検討では、上記を踏まえ、20年調査時以降の10年間において、外観観察を中心にしながら20年経過時の詳細調査と同内容の調査を実施した。

7.1.2 調査内容

(1) 工法概要

図-7.1に示すように暴露試験体は-1.23m～+1.27mの範囲に施工し、また、後述のとおり、上部の約35cmの範囲は1998年に打ち替えたものである。コンクリートの材令が2015年現在で31年と17年のもの（以下、それぞれ「N-31y」、「B-17y」という。）が存在している。被覆厚は150mmで、内部構造は写真-7.1のとおり鋼管杭にスタッドジベル(M16×70：350本)を水中スタッド溶接により溶接し、縦横に鉄筋(D25：218.3kg, D10：17.0kg, SD295A)を配置した。

内部鉄筋のかぶりは80mmである。コンクリートは、

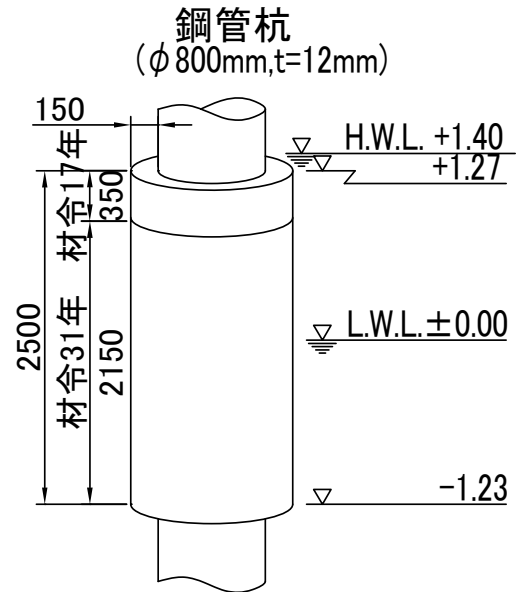


図-7.1 本工法の防食被覆の範囲

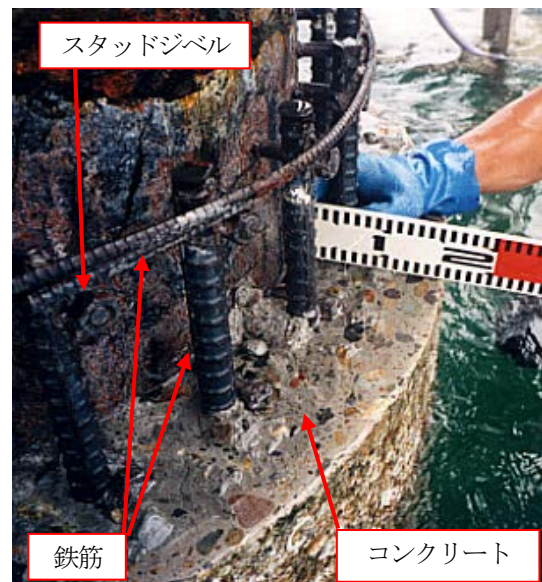


写真-7.1 内部構造

表-7.1 コンクリートの配合

		N-31y	B-17y
呼び方		24-(50)-25N	24-(50)-20B
セメントの種類		普通ポルトランド	高炉B種
目標空気量(%)		4.0	4.0
W/C(%)		50.5	46.0
s/a(%)		40.0	40.0
単位量 (kg/m ³)	水	240	215
	セメント	475	467
	細骨材	592	611
	粗骨材	906	948
	AE減水剤	5.25 l/m ³	4.67 l/m ³
増粘材(kg/m ³) ^{※1}		3.8	2.5
高性能減水剤(l/m ³) ^{※2}		4.75	10

※1 増粘剤：N-31yがアクリル系、B-17yがセルロース系

※2 高性能減水剤：いずれもメラミンスルホン酸系

レディミクストコンクリートに増粘剤と高性能減水剤を現場で添加し作製した水中不分離性コンクリートを用いた。打設にはコンクリートポンプ車を用い、N-31yの場合、海水位がL.W.L.付近まで下がった際に鋼製型枠上端部から打設、B-17yの場合、鋼製型枠内部の海水を除去した状態で打設した。コンクリートの配合を表-7.1に示す。いずれも設計基準強度は 24N/mm^2 、目標スランプフローが $50\text{cm}\pm 3\text{cm}$ で、セメントはN-31yには普通ポルトランドセメント、B-17yには高炉セメントB種を使用した。GmaxはN-31yが 25mm 、B-17yが 20mm である。

(2) 外観観察

1984年8月に鋼管杭No.29に本工法による防食を適用して以降、主に被覆のひび割れや剥落、錆汁の滲出などの被覆の表面に現れる変状について毎年外観観察調査を行った。

(3) 圧縮強度

被覆コンクリートからコアを採取し、JIS A 1108に準拠し、圧縮強度を測定した。B-17yは材齢6年（2004年採取）及び材齢11年（2009年採取）において、N-31yは材齢21年（2005年採取）において圧縮強度を測定した。コアの採取位置を図-7.2に示す。

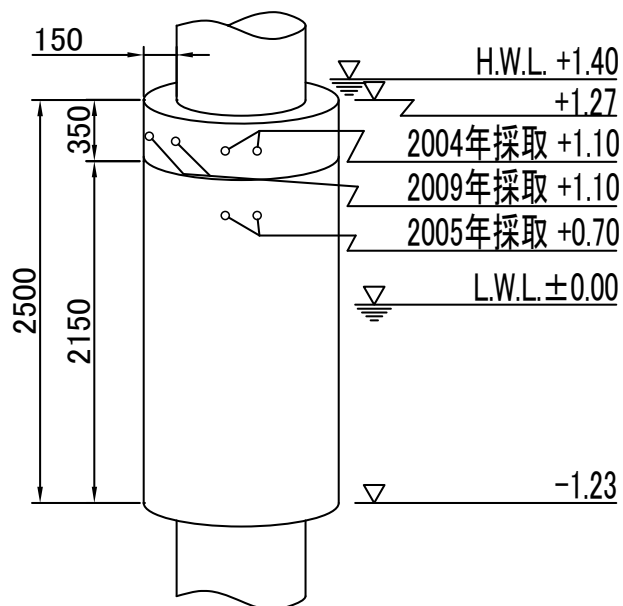


図-7.2 コアの採取位置

(4) 塩化物イオンの浸透性状

被覆コンクリートからコアを採取し、JIS A 1154に準拠し、全塩化物イオン濃度の測定を行った。コアの採取位置は圧縮強度測定用のコア採取位置と同様である（図-7.2）。

(5) 鋼管杭及び内部鉄筋の電位

本工法を適用した鋼管杭には2007年6月に流電陽極式

電気防食工法が適用されており、電気防食による防食効果が被覆内部の鋼材に及ぶことが考えられるため、2009年には採取したコア内部の鋼管杭の電位、2015年には被覆コンクリート内部鋼材（鉄筋）の電位を測定した。

7.1.3 調査結果

(1) 外観観察

試験開始から12年経過時までは、外観上、コンクリート表面に錆汁、ひび割れ、その他の損傷は見られなかったが、13年経過した1997年の調査の際に、上端から250mm程度下の位置にコンクリート被覆層を1周する幅 $1\sim 3\text{mm}$ 程度のひび割れが確認された。これについては20年時の調査結果にも記述したが¹⁾、本工法の被覆範囲(-1.23m～+1.27m)より上部は1983年（栈橋建設）から1997年までの間は無防食で全面錆に覆われており、1997年の肉厚測定では $3\sim 5\text{mm}$ の腐食量を示していた。また、本工法のコンクリート内部の鋼管杭における腐食量は、ひび割れより上部では $1\sim 2\text{mm}$ 程度、下部では 0mm であったことから、無防食であった鋼管杭上方の腐食が本工法のコンクリート被覆部まで徐々に進行し、その膨張圧が主たる要因で、拘束の無い無筋部分のコンクリート部にひび割れを生じさせたと考えられる。したがって、このひび割れは、被覆自体の劣化ではないと考えられる。

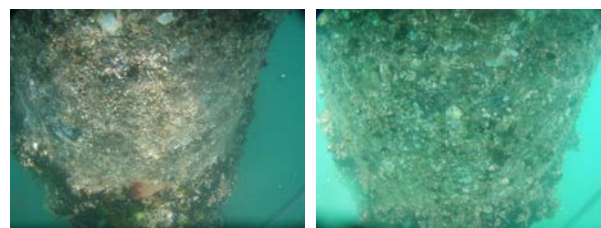
ひび割れより上部は、1998年に破損部を撤去してコンクリートを打ち直して補修した。それ以降、打ち直した範囲(17年経過)を含め、31年を経過した現在に至るまで外観上に異状は無く、良好な防食状態を維持している。被覆表面の状態を写真-7.2及び写真-7.3に示す。



海側面

陸側面

写真-7.2 本工法の被覆表面(上部17年,下部31年経過)



海側面

陸側面

写真-7.3 本工法の被覆表面(31年経過時)

(2) 圧縮強度

圧縮強度の経時変化を図-7.3に示す。設計基準強度はいずれも 24N/mm^2 であるが、初期の測定値はない。N-31yの材齢21年時点での圧縮強度が設計基準強度を若干上回る程度であったのに対し、B-17yについては、設計基準強度を大きく上回る圧縮強度を保持していた。この違いは、N-31yが一部に水中自由落下を伴う水中打設に対し、B-17yは気中打設であり、打設方法の差異があることや、B-17yのW/Cが0.46と小さいことが影響していると考えられる。また、N-31yは国内で水中不分離性コンクリートが使用され始めた初期のもので、施工方法も含め品質の安定性が現在と比較して低かった可能性も考えられる。

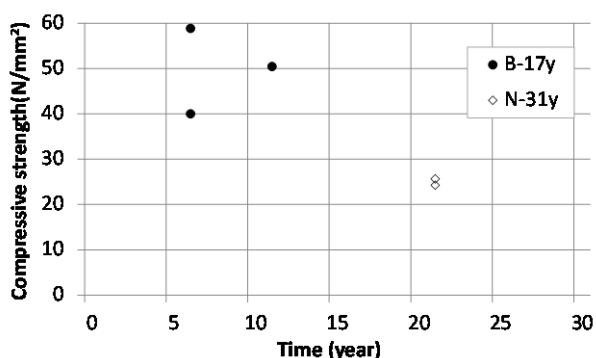


図-7.3 圧縮強度と材齢の関係

(3) 塩化物イオンの浸透性状

被覆コンクリート中の塩化物イオン量の分布を図-7.4に示す。Fickの拡散方程式の解により分布を近似²⁾し、見掛けの拡散係数を求めると、B-17yの材齢6年及び11年測定値から $0.19\sim 0.30\text{ cm}^2/\text{年}$ であった。N-31yは値の変動が大きく計算不能であった。

また、N-31yの鋼材表面において濃度が増加していた。この理由としては、コンクリートと鋼材の界面からの塩

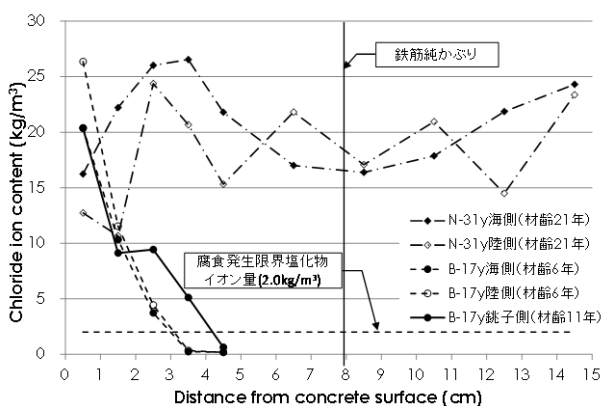


図-7.4 被覆コンクリート中の塩化物イオン量

分浸透が考えられる。同様な結果が、港湾鋼構造物の実構造物調査により確認されている³⁾。その結果の一例を図-7.5に示す。モルタル被覆及びコンクリート被覆のいずれも鋼材表面において濃度が増加しており、モルタル、コンクリートと鋼材の界面からの塩分浸透が考えられた。

(4) 塩化物イオンと鋼材腐食の関係

文献1)に示されているように、N-31yでは、21年経過時点で既にコンクリート表面から内部まで 20kg/m^3 程度の高い塩化物イオン濃度を示しており、港湾基準における腐食発生限界塩化物イオン濃度である 2.0kg/m^3 程度⁴⁾より明らかに高かった。しかし、コア採取跡の内部鋼材の目視観察においても顕著な発錆は認められなかった(写真-7.4)。海中部および干満帯においては、コンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量を超えていても、コンクリートが湿潤しているため、鋼材の腐食に必要な酸素の供給が少なく鉄筋の腐食速度は遅いことが示された(なお、コンクリートの含水率は測定していない)。同様な結果が、港湾鋼構造物の実構造物調査により確認されている³⁾。

また、1997年までの期間においては、被覆上部に無防食の部分があり、腐食が進行していたため、被覆の内部鋼材に対して、無防食の部分のアノードとするマクロセルが形成され、被覆の内部鋼材の腐食進行が抑制されたことも考えられる。

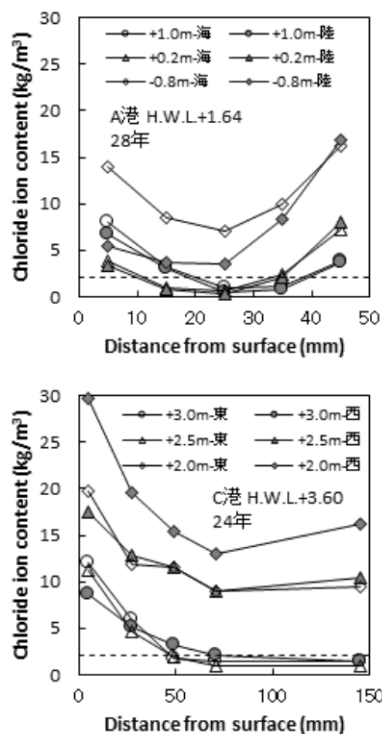


図-7.5 塩化物イオン濃度分布

(上：モルタル被覆，下：コンクリート被覆)³⁾



写真-7.4 コア採取孔内部の鋼材（鋼管杭）の腐食状況

(5) 電気防食併用の効果

電位の測定結果を表-7.2に示す。鋼管杭、内部鉄筋、いずれの電位も-900mV (vs.Ag/AgCl) 程度を示したことから、電気防食を適用した2007年6月以降は、電気防食の効果が被覆内部の鋼材に及んでいると考えられる。

現在の港湾施設では被覆防食に電気防食を併用する防食方式が一般的に適用されるため、本試験と同様、海中部及び干満帯の下部においては鉄筋コンクリートの内部鋼材への防食効果が期待できると考えられる。

表-7.2 電位測定結果

測定時期	測定位置		電位 mV (vs.Ag/AgCl)	
2009年	鋼管杭 (コア内部)	+1.1m	-864	
		鋼管杭 (水中部)	-1.5m	-998
2015年	鋼管杭 (水中部)	-2.0m	-995	
		-2.5m	-990	
		-3.0m	-998	
		内部鉄筋 (被覆表面)	+1.0m	海側 -890
	内部鉄筋 (被覆表面)	+0.5m	陸側	-900
			海側	-920
		陸側	-940	

7.1.4 防食性能評価及び性能低下予測に関する検討

コンクリート構造物の場合、鋼材位置の塩化物イオン濃度を基に、現況の鋼材の腐食の予測や、将来の性能低下予測が行われている²⁾。コンクリート被覆の場合も、これと同様な評価が可能であると考えられている。以下、7.1.3での結果を基に、検討を行う。

(1) コンクリート被覆中の鋼材腐食の評価

7.1.3(4)で示したように、鋼材位置における塩化物イオンが高濃度であっても顕著な鋼材腐食がみられない場合が多い。この主要因としては、前述のとおり、特に海中部及び干満帯においては、コンクリートが湿潤しているため、鋼材表面への酸素供給が少ないことが考えられる。このことから、コンクリート被覆の場合、鋼材位置の塩化物イオン濃度による被覆中の鋼材腐食の判定は難しいことが示唆された。

(2) コンクリート被覆中の塩化物イオンの浸透予測

コンクリート構造物の場合、鋼材位置の塩化物イオン濃度の将来予測をFickの拡散方程式の解により行っている。この際、コンクリートの表面（暴露面）から徐々に内部に塩化物イオンが浸透すると考えている。一方、コンクリート被覆においては、7.1.3(3)で示したように、コンクリートの表面（暴露面）からだけでなく、コンクリート-鋼材界面からの浸透が確認された。このことから、塩化物イオン濃度の将来予測時に、コンクリート-鋼材界面からの浸透も考慮する必要性が示唆された。

以上のことから、コンクリート被覆工法の防食性能評価及び性能低下予測手法の検討にあたっては、現時点において、コンクリート構造物の場合と同様の、塩化物イオンに着目した評価手法の適用が難しいことが示唆された。今後は、実構造物における鋼材の腐食発生状況、および塩化物イオンの浸透の実態に関する知見を蓄積し、更なる検討が必要である。

7.1.5 補修工法に関する検討

鉄筋コンクリート被覆工法の補修方法として、小さな損傷に水中硬化形エポキシ樹脂材による補修、大きな損傷に対して損傷部のコンクリートの撤去・再施工が示されている⁵⁾。

本暴露試験においては、前述のとおり1998年に被覆上部の打ち替えを行っており、また、2006年、2007年及び2009年にコンクリートの物性や含有塩化物イオンの測定を目的としてコンクリートコアの採取を行い、採取跡を水中硬化形エポキシ樹脂で補修した。

前者を大きな損傷に対する補修、後者を小さな損傷に対する補修として検討した結果を以下にまとめる。

(1) 打継による補修（大きな損傷に対する補修）

1998年に被覆上部を撤去し、図-7.6のとおり+0.32mより上部350mmの範囲のコンクリートを打ち直した。この際の打継部が被覆の弱点となる可能性が高い。

打継の処理として、既設コンクリートの撤去面は目荒らしを施し(写真-7.5)、コンクリート接着剤(ポリモルタル)を塗布して上部のコンクリートを打設した。

1998年の補修直後の状態を写真-7.6に、補修後19年経過時(2015年)の状態を写真-7.7に示す。写真-7.6において既設(下方)のコンクリート表面に見られる錆跡は、1997年まで被覆防食が施されていない本工法より上部の鋼管杭からの流れ錆の跡で、1999年の調査以降は写真-7.7と同様な表面状態を示している。打継部分に関しても、被覆の表面に錆汁の滲出などの変状が見られず、良好な状態を維持しているものと考えられる。

したがって、大きな損傷に対してコンクリートの撤去、打ち替えなどの補修を行う場合、適切な打継処理を行うことで、弱点となる可能性の高い打継部分の劣化進行を抑制することが可能であると考えられる。

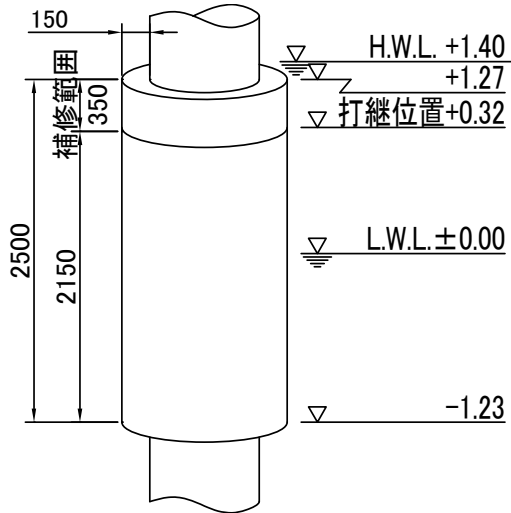


図-7.6 打継位置と補修範囲

で貫通させ（写真-7.4），採取跡は特に処理を施さずに水中硬化形エポキシ樹脂を充填して補修した（写真-7.8）．補修は+1.1m及び+0.7mは気中で，-0.5mは水中での作業で補修作業を行った．

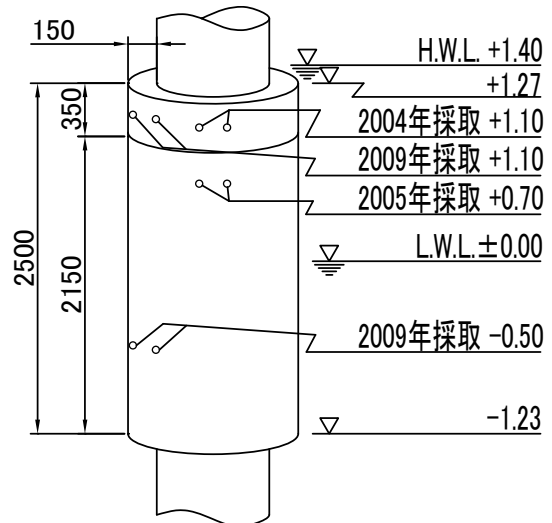


図-7.7 コアの採取位置



写真-7.5 打継面の目荒らし 写真-7.6 補修直後の状態
(1998年撮影)



打継範囲 打継部の接写
写真-7.7 補修後19年経過時 (2015年撮影)

(2) 水中硬化形エポキシ樹脂による補修（小さな損傷に対する補修）

2004年，2005年及び2009年に図-7.7の箇所においてコンクリートの物性や含有塩化物イオンの測定を目的としてコンクリートコアの採取を行い，その都度水中硬化形エポキシ樹脂を充填して補修した．補修に使用した材料は，第4章の水中硬化形被覆に使用するパテタイプの水中硬化形エポキシ樹脂に類似のものである．いずれの場合も被覆厚全長のコアを採取しており，鋼管杭に達するま

写真-7.9～写真-7.11は，それぞれ2004年，2005年，2009年に補修した部分の2015年の状態である．現時点での経過年数は最大で11年であるが，被覆の表面に錆汁の滲出などの変状が見られず，良好な状態を維持しているものと考えられる．

したがって，小さな損傷に水中硬化形エポキシ樹脂を充填して補修する方法は，少なくとも11年程度以上の耐久性を有するものと考えられる．

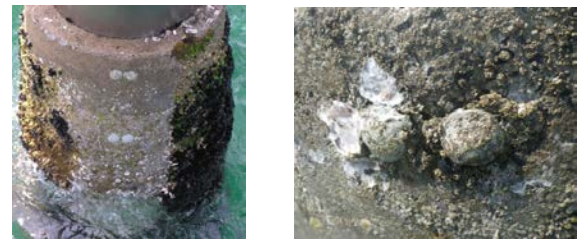


写真-7.8 補修後の状態 写真-7.9 2004年補修部
(2015年撮影)

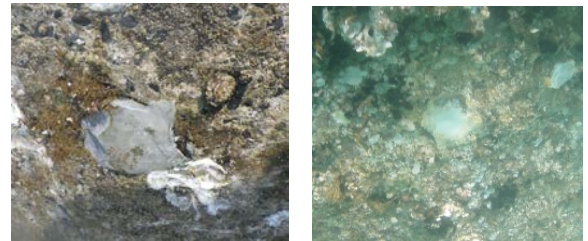


写真-7.10 2005年補修部 写真-7.11 2009年補修部
(2015年撮影)

7.1.6 まとめ

(1) まとめ

コンクリート被覆工法について、30年間の調査により以下の結果が得られた。

- 1) 鉄筋コンクリート被覆工法は、適切な施工が行われた場合、30年経過時点において、外観上の変状が見られなかった。
- 2) 21年経過時点において、コンクリート被覆内部の鋼材表面で塩化物イオンが高濃度であっても、内部鋼材に腐食が見られなかった。この主要因としては、本被覆が適用されている海中部や干満帯においては、コンクリートが湿潤しているため、鋼材表面へ供給される酸素の供給量が少なかったこと等が考えられる。
- 3) コンクリート部への塩化物イオンの浸透に関して、コンクリートの暴露面（表層）からだけでなく、コンクリートと鋼材の界面からの塩分浸透も示唆された。
- 4) 補修にあたっては、打継による補修（大きな損傷に対する補修）及び水中硬化形エポキシ樹脂による補修（小さな損傷に対する補修）ともに適切な補修方法と適切な補修材料を選定することで補修部の耐久性を保持することが可能であることが確認された。

(2) 今後の課題

海水中及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、塩化物イオンの浸透による被覆の性能予測が難しいことが示唆された。今後は、実構造物における鋼材の腐食発生状況、および塩化物イオンの浸透の実態に関する知見を蓄積し、更なる検討が必要である。

性能評価、劣化予測及び補修時期の判断に関しては、上述のように、定量的な劣化指標となるものが確立されていない。今後の検討が望まれる。

7.2 モルタル被覆工法（GRCカバー工法）

7.2.1 はじめに

モルタル被覆工法は、被防食体である鋼管杭などをモルタルで被覆し、セメントモルタルの持つ強いアルカリ性によりセメントモルタル内部の鋼材表面に形成される緻密な不導体被膜で、鋼材面を腐食作用から保護することを特徴とする被覆防食工法である。なお、モルタルの保護のため、一般に保護カバーが取り付けられる。

本試験に適用したモルタル被覆工法は、GRCを永久型枠として採用した工法（GRC 補強カバー工法）である。

GRCとは、セメント又はセメントモルタルを耐アルカリガラス繊維で補強したガラス繊維補強セメントの略称である。GRC補強カバー工法は、このGRCを永久型枠として採用した工法で、カバー内部のモルタルにより防食することなどを特徴とする被覆防食工法である。なお、本工法は一般的なモルタル被覆工法と異なり、モルタル内部に鉄筋メッシュが配置されている。

本工法は現状で使われておらず、多少特異ではあるが、基本的には、モルタル被覆と同系統と考えることができ、本工法より得られたデータは、モルタル被覆の耐久性評価に関する参考データとなり得る。そこで本調査では、他の工法と同様に、各種調査を実施した。

7.2.2 調査内容

(1) 工法概要

図-7.8に示すように、暴露試験体は+0.77m～+4.27mの範囲に施工した。被覆の構成は、12mm厚のGRCカバーとその内部のモルタル層110mmである。内部構造は図-7.9のとおり鋼管杭にスタッドジベルを溶接し縦横に鉄筋を配置、型枠となるGRCカバー上部からモルタルを打設した。GRC補強カバーは、カバー外側にバンドを取り付けて固定した。モルタルの配合を表-7.3に示す。

なお、2000年からは、当該杭に流電陽極方式の電気防食が適用されている。

表-7.3 モルタルの配合

スランブフロー(cm)	55	
目標空気量(%)	4.0	
W/C(%)	48	
単 位 量 (kg/m ³)	水	381
	セメント	790
	細骨材	870
増粘材(kg/m ³) ^{※1}	4.95	
高性能減水剤(kg/m ³) ^{※2}	12.74	

※1 増粘材：セルローズ系

※2 高性能減水剤：メラミンスルホン酸系

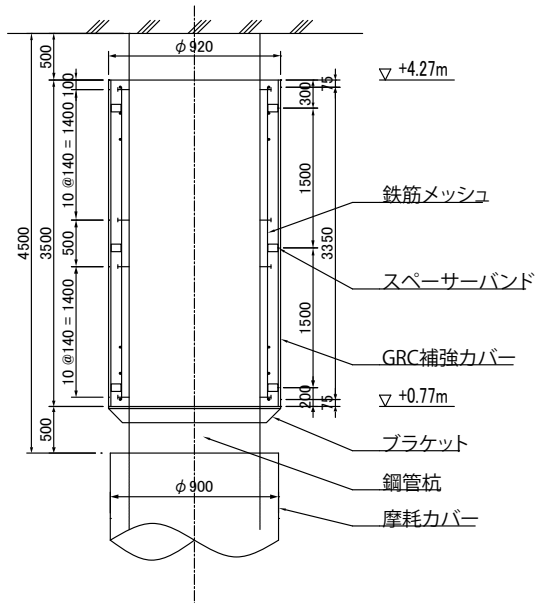


図-7.8 本工法の防食被覆の範囲

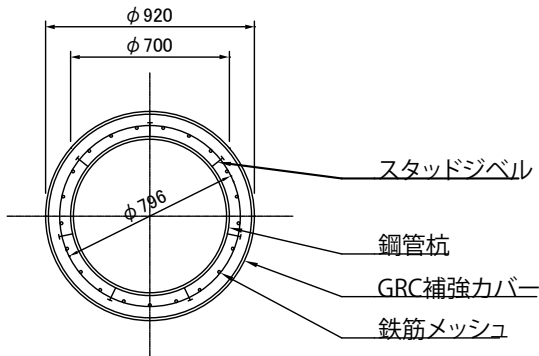


図-7.9 内部構造



写真-7.12 コアの採取位置

(2) 外観観察

1985年9月に鋼管杭No.17に本工法を適用して以降、基本として毎年定期的に外観観察調査を行っている。

なお、1995～2003年度、2005～2007年度においては、調査を行っていない。

(3) 塩化物イオンの浸透性状

被覆コンクリートからコアを採取し、全塩化物イオン濃度の測定を2004年に行った。コアの採取位置を写真-7.12に示す。

(4) 鋼管杭の肉厚測定

2009年に被覆を一部撤去して内部の鋼管杭の肉厚を測定した。測定位置は海側面、陸側面において被覆の適用範囲内においては+4.0m～+1.0mで6深度の測定を行った。

7.2.3 調査結果

(1) 外観観察

試験開始以降の主な変状の記録を表-7.4に示す。表中の劣化度については、文献6)を基に判定を行った。

また、試験開始直後である1年経過時と、特に大きな変化を示した7年、19年及び30年経過時の外観を写真-7.13～写真-7.17に示す。

表-7.4 主な変状等の記録

年月 (経過年数)	内容	劣化度
1985年9月(0年)	施工	d
1986年6月(1年)	カバー締付バンドの発錆が認められるが良好	d
1987年7月(2年)	バンドの発錆が増大	d
1989年7月(4年)	バンドの発錆が更に増大した	d
1991年7月(6年)	バンドが腐食で3箇所破断脱落、GRCカバー天端部で15mmの隙間	c
1992年7月(7年)	GRCカバーの上端部が一部(幅0.7m×高0.7m程度)脱落、モルタルも一部剥落	c
1993年7月(8年)	GRCカバーの脱落範囲が幅0.7m×高2.5m程度に拡大	b
2004年7月(19年)	GRCカバーは下端部の一部以外脱落、陸側面の大半と海側面の上端部付近で鉄筋露出	a
2008年7月(23年)	鉄筋の露出範囲が全周で拡大、+3.5m付近の横鉄筋の一部が破断	a
2010年8月(25年)	横鉄筋の破断範囲が+2.5m～+3.5mに拡大	a
2014年8月(29年)	被覆上端付近から鉄筋内部のモルタルが脱落し鋼管が露出	a

試験開始から6年経過時にカバー固定用の鋼製バンドが腐食により破断、脱落し、その後GRCカバーが徐々に脱落、内部鉄筋より外側のモルタルもカバーと共に又はカバー脱落后に剥落した。露出した鉄筋の腐食が進行して鉄筋が破断し、鉄筋内部のモルタルの脱落が始まった。



写真-7.13 1年経過時の外観（1986年撮影）



海側面 陸側面
写真-7.16 30年経過時の外観（2015年撮影）



写真-7.14 7年経過時の外観（1992年撮影）



写真-7.17 30年経過時の被覆上端部の外観(2015年撮影)



海側面 陸側面
写真-7.15 19年経過時の外観（2004年撮影）

(2) 塩化物イオンの浸透性状

被覆モルタル中の塩化物イオン量のグラフを図-7.10に示す。

横軸は被覆のモルタル層の厚みを示し、右端が鋼管杭との界面である。初期の厚みが11cmであるが、被覆表面のモルタルが上部で4cm、下部で2cm失われているため、グラフの各々の曲線の左端がモルタルの表面である。

いずれも腐食発生限界塩化物イオン量を大きく上回っており、下部より上部の方が多量の塩化物イオンを含んでいた。本被覆の表面を覆っていたGRCカバーは、上部から順次脱落したため、被覆の下部に比して上部の方がモルタルの露出期間が長いことが、この差の要因と考えられる。

モルタル表面からの塩化物イオンの拡散傾向がみられるとともに、鋼管杭との界面において上昇若しくは変化の無い状態が確認され、モルタルと鋼管杭界面からの塩化物の浸透が考えられる。この傾向は、7.1 コンクリー

ト被覆工法の場合と同様である。

なお、コアの採取跡から確認した内部の鋼管杭には発錆が確認された(写真-7.18)。

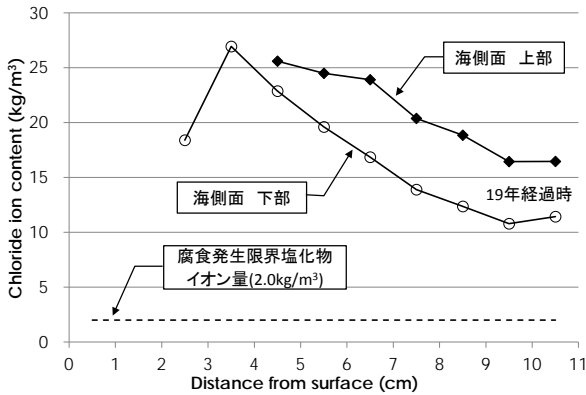


図-7.10 被覆モルタル中の塩化物イオン量



写真-7.18 コア採取孔内部の鋼材(鋼管杭)の腐食状況(+2.0m付近)

(3) 鋼管杭の肉厚測定

鋼管杭の肉厚測定結果から算出した腐食速度を図-7.11に示す。杭No.17が本工法の適用された鋼管杭で、No.23, 26, 30は被覆防食が適用されていない鋼管杭であり、いずれの鋼管杭にも水中部には流電陽極方式の電気防食が適用されている。電気防食の適用開始時期は、杭No.17が2000年で、杭No.23, 26, 30は1984年である。

被覆の適用されていない+4.27mより上部、及び+0.77mより下部については、無防食杭と類似の腐食傾向がみられるが、被覆の適用範囲である+4.27m～+0.77mの範囲では、無防食の鋼管杭と明らかに異なる腐食傾向がみられる。なお、+1.0mにおいては電気防食の効果によりすべての鋼管杭に同様の傾向がみられる。

本被覆防食については、10年程度経過した時点で外観

上の変状が激しくなったが、それ以降も内部鋼材の腐食は抑制されていたと考えられる。また、No.17鋼管杭の腐食速度は被覆上端から下端にかけて徐々に小さくなる傾向が見られることから、GRCカバー脱落、内部モルタルの剥落が開始した上端部から徐々に下部へ腐食が進行したと考えられる。

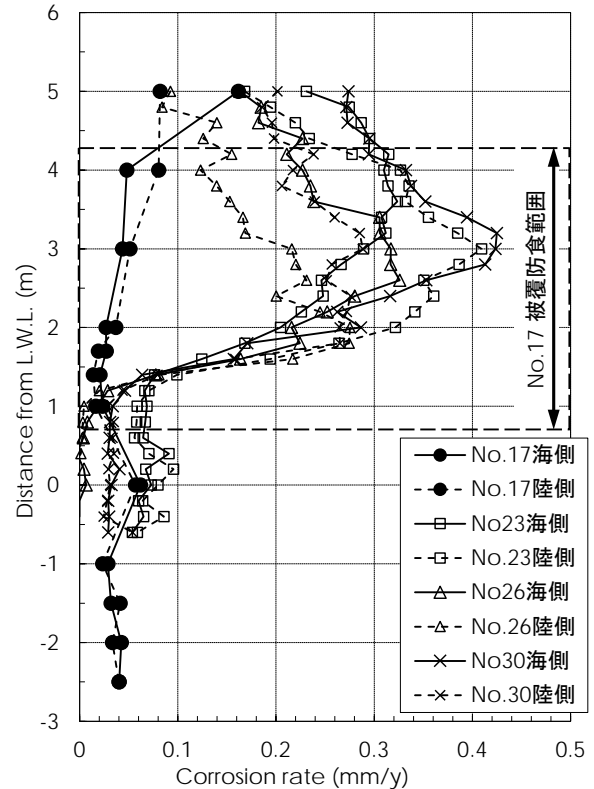


図-7.11 鋼管杭の腐食速度

7.2.4 まとめ

モルタル被覆工法(GRCカバー補強工法)について、30年間の調査により以下の結果が得られた。

GRCカバー補強工法は、カバー固定用の鋼製のバンドの脱落、GRCカバーの脱落、内部鉄筋より外側のモルタルの剥落、露出鉄筋の腐食進行、鉄筋破断、鉄筋内部のモルタル脱落という劣化のシナリオをたどっており、30年経過時点において、被覆上端部付近の鋼管杭が露出し始めている。

GRCカバーの脱落、モルタルの剥落等の劣化進行が速かった被覆上部において、モルタル中の塩化物イオン量が多く、また鋼管杭の腐食速度も高い傾向が見られた。

しかしながら、外観上は劣化が激しいように見える被覆であっても腐食速度は低く抑えられており、防食性能は失われながらも、一定の効果は保持していたと考えられる。

本工法の劣化進行は、カバーを固定するバンドの腐食、脱落に端を発していることから、耐食性を有する材料によりカバーを固定していれば、劣化進行を抑制することが可能であったと考えられた。モルタル被覆に用いるカバーについては、カバー自体の材料選定ばかりでなく、その固定部材の選定にも留意が必要である。

参考文献

- 1) 宮田義一, 阿部正美, 濱田秀則, 清水一夫, 中野啓眞, 芥川博昭: 鋼管杭の防食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, pp.50-53, 2006.6.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], pp.169-178, 2013.10.
- 3) 山路徹・山本幸治・与那嶺一秀: 実海洋環境において長期間供用されたモルタルおよびコンクリート被覆工法の防食効果, 第62回材料と環境討論会, 2015.11.
- 4) 公益社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.9.
- 5) 防食・補修工法研究会: 港湾鋼構造物防食工法・補修工法・維持管理実務ハンドブック, pp.6.6.16-6.6.19, 2014.3.
- 6) (財)沿岸技術研究センター: 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 2007.

8. 電気防食工法

電気防食工法は、流電陽極方式と外部電源方式の2種類に大別される。

流電陽極方式は、鋼材と比較して卑な金属（例えば、アルミニウム合金陽極や亜鉛陽極であり、以下陽極と呼ぶ）を鋼材と電氣的に接続し、鋼材との電位差を利用した電池作用によって防食電流を鋼材へ供給する。現在の港湾環境下における電気防食工法は、流電陽極方式が主流である。実用的には鋼材表面に拡散してくる溶存酸素を防食電流で還元し、鋼材表面が脱気状態の電位である-780mV（海水銀/塩化銀電極）よりも卑であれば防食が可能となっている。

一般に、流電陽極は溶接により鋼材に固定されるが、本検討では、新たな試みとして、磁石により固定する方法についても検討を行った。

8.1 流電陽極方式電気防食（溶接による固定方法の場合）

8.1.1 はじめに

波崎棧橋では、アルミニウム合金陽極を使用した電気防食工法の試験を30年間実施しており、各年度の電位測定やモニタリングを行っている。20年までの調査結果¹⁾では、サンドエロージョン環境下においてもその確実な防食効果を示したことを報告している¹⁾。

本方式の工法は、防波堤などに囲まれた比較的海象の穏やかな環境下における電気防食工法の効果は広く認知されているが、波崎のような高波浪環境下における電気防食特性については調査事例が少ない。

上記を踏まえ、本検討では、高波浪環境下の電気防食特性について検討を行うため、波崎棧橋に設置された流電陽極方式電気防食工法について調査を行った結果をまとめた。また、電気防食工法の維持管理方法の高度化に関する試みについても検討を行った。

8.1.2 調査概要

アルミニウム合金陽極（期待耐用年数10年）が設置された杭について、各年度の定期調査時に電位測定を実施している。測定には内部入力抵抗が1MΩ以上の電位差計と海水銀塩化銀電極を用いた。測定を実施している杭を表-8.1に示す。

8.1.3 調査結果

測定を実施している各杭の電位経時変化を図-8.1に示す。なお、No.24は陽極の固定方式が異なるため8.2に記述した。

「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）²⁾」によれば、基準電極に海水塩化銀電極を用いた際、鋼材の電位が-780mVよりも卑であれば鋼材の腐食が停止している、言い換えれば健全な防食状態であると記載がある。図-8.1に示した電位の経時変化は、測定年度ごとにばらつきを生じているが、防食状態を維持しているときは-900~-1000mVの間を推移していることが分かる。図中の測定値のばらつきは、海象の影響による海面および海底地盤の移動等により被防食面積が変化していることが原因の一つとして考えられる。また、通常環境であれば鋼材表面には海水中のMgイオンやCaイオンを主成分とするエレクトロコーティングが生成し酸素の拡散障壁となり、電位も定常状態に近づくことが考えられるが、波崎は波浪や荒天時のサンドエロージョンによる影響が大きいと推測される。No.13の2011年度やNo.17の2005年度のように鋼材の電位が-780mVよりも貴となり不完全な防食状態となってしまう場合、直前（前年度や前々年度）の電位測定値が貴側に上昇している傾向がある。一部、-780mVよりも貴になった電位が翌年度の電位測定時に急激に卑化しているグラフがある（例えば、No.13の2014年度）が、これは陽極を新たに設置したことにより防食状態になったことを示している。

表-8.1 定期調査時に電位測定を実施している杭一覧

杭 No	13	14	17	22	23	24	26	27	30	31
陽極設置年度	2000	2000	2000	1984	1984	2010	1984	2001	1985	2001
陽極更新年度	2014	2014	2014	1996, 2012	1993, 2004, 2014	—	2001, 2012	—	1993, 2014	—

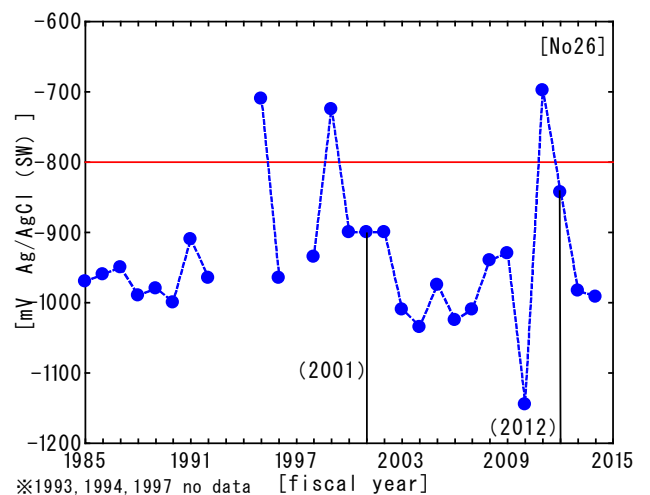
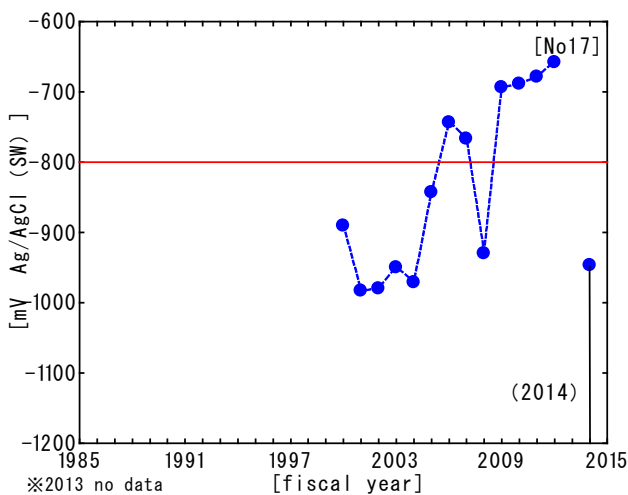
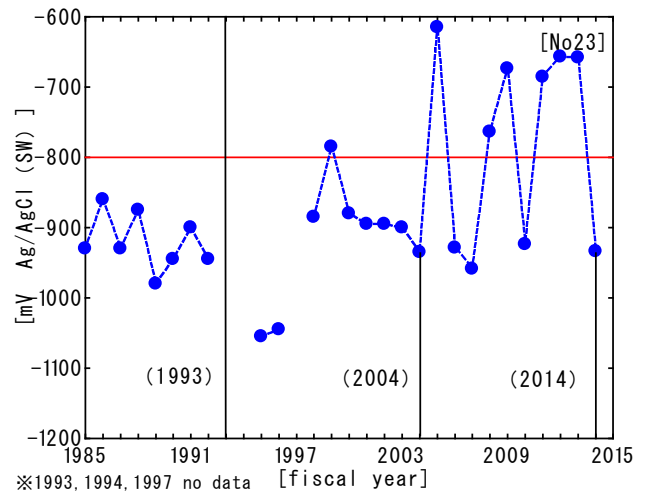
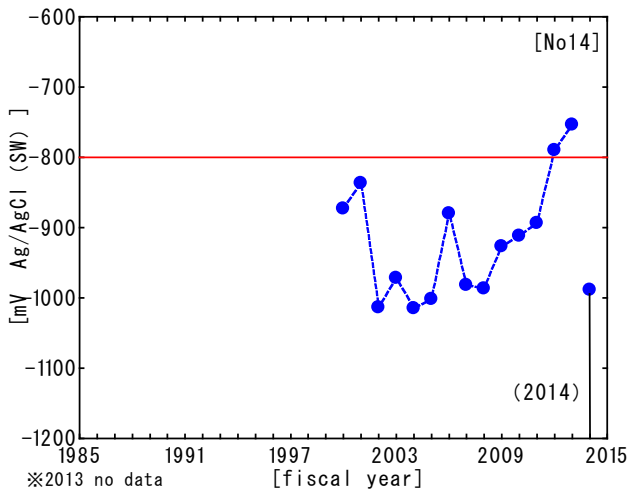
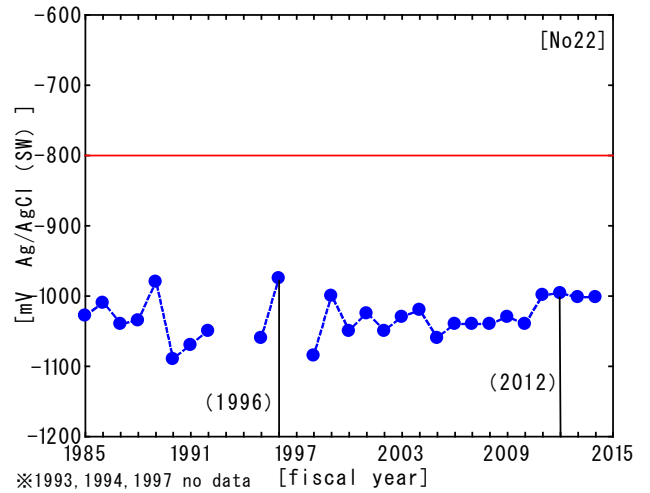
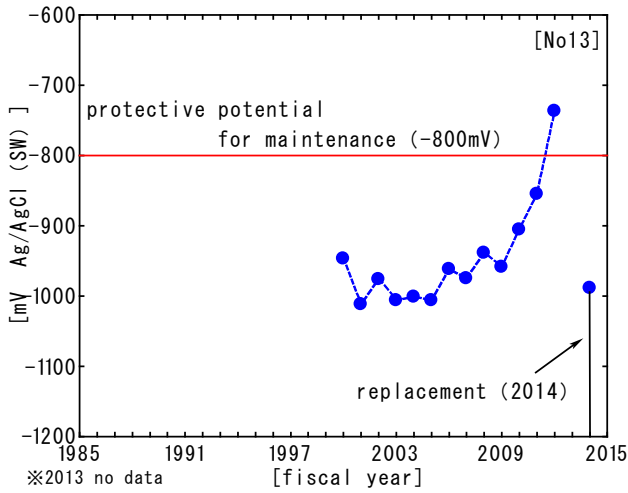


図-8.1 各杭の電位経時変化 (その1)

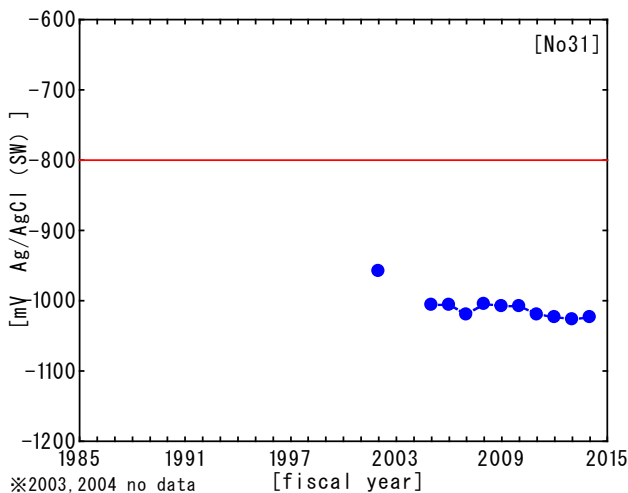
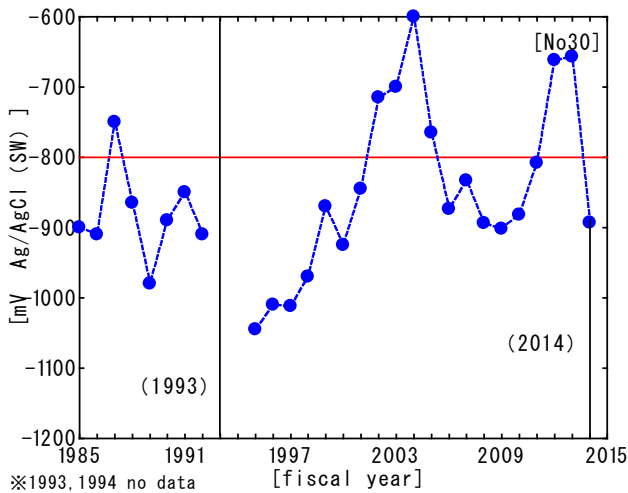
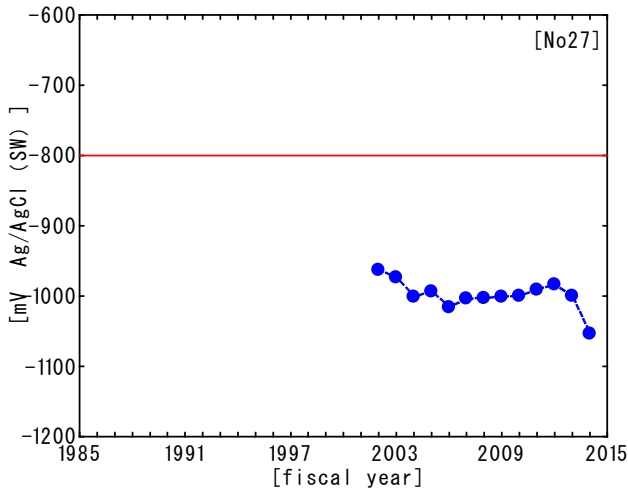


図-8.1 各杭の電位経時変化 (その2)

8.1.4 維持管理の高度化に関する試み

(1) 劣化度判定の細分化の検討

港湾鋼構造物の維持管理時において、電位計測結果に対し、劣化度として評価を行っている。

現状の劣化度は、「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (2009年版)²⁾」に記載されている電気防食の維持管理を行う際に基準となる-800mV (防食管理電位) を閾値として評価している。評価は閾値である-800mVよりも卑であれば健全な防食状態である「d」、-800mVよりも貴であれば不完全な防食状態である「a」と判定される。なお、これらの適用範囲は、あくまで設置からある程度年数が経過した後であり、陽極設置直後については適用範囲外である。

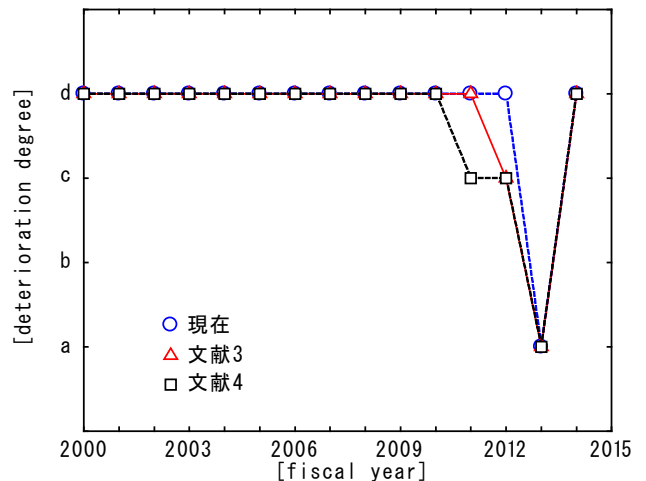


図-8.2 劣化度の経時変化の一例 (No.13)

ここで、時間が経過し、陽極の耐用年数に近づいてくると、陽極が消耗し、図-8.1の一部の図のように電位は徐々に防食管理電位-800mVに近づいてくる。実態として、-800mV付近まで貴化した際は、劣化度がdと判定されていても、陽極が相当程度消耗していると推測される。そのため、例えば昨年の測定結果がdであったのに、翌年には劣化度aと評価されることもあり得る。

この問題を解消するため、電位の閾値をより細かく分類し、劣化度bやcに相当する劣化度の区分の提案が2種類行われている。1つは、-800mVより貴電位を「a」、-825mV～-800mVを「b」、-850mV～-825mVを「c」、-850mV以下を「d」とする評価方法³⁾である (図-8.2 凡例: 文献3)。もう1つは、ある実構造物の調査結果から通電約3年後以降の電気防食管理法として-800mVより貴電位を「a」、-800mV～-935mVを「b～c」、-935mV以下を「d」とする評価方法⁴⁾である (図-8.2 凡例: 文献4)。

上記の2手法には課題もあるが、電位に関する劣化度を細分

化した際に、どのような情報が得られるのかを検証することを目的として、図-8.1の電位測定結果を、劣化度として評価を行った結果の一例を図-8.2に示す。なお、劣化度は上述の3種類の方法で評価した。

提案された2つの方法の場合、劣化度がdから突然aになることはなく、劣化度cの段階が存在していることが分かる。このことは、電位計測のみでより適切に陽極交換時期を推定することが可能となることを示唆するものである。

ただし、電位の値は、水質、流速など各種要因の影響を大きく受ける。河川近くの港湾施設などでは雨季や荒天時に淡水が混じることにより電位が貴化することも考えられる。また、波崎のような高波浪海域では、波浪の影響を受け、値が変動する場合がある。よって、劣化度を詳細に区分する本評価手法は、より多くの実構造物データを収集し、慎重に設定する必要がある。これについては今後の検討課題としたい。

(2) 電位計測の頻度の設定

流電陽極方式の電気防食工法の点検・調査項目は、「港湾の施設の点検診断ガイドライン⁹⁾」に記載されているように、一般定期点検診断は3あるいは5年に1回程度の頻度で電位測定が実施されることになっている。一般定期点検診断時の電位測定結果に異常が認められた場合は、陽極の取付け状況や消耗量調査、必要に応じて水質などの環境調査を行う詳細臨時点検診断が実施される。

波崎栈橋の環境は、サンドエロージョンの影響や高波浪環境、漂砂の移動等により鋼材の防食環境が定常化しにくい。また、設置されている流電陽極の期待耐用年数が10年程度と短いため、陽極の消耗時期を見逃しやすい。そこで1年に1回程度の電位測定を実施することで異常の有無を判断している。特殊な条件下においては、防食対象物の置かれる環境や既設陽極の設置状況などを総合的に判断し、計測頻度を設定する必要がある。

8.1.5 高波浪海域での電気防食特性⁹⁾

近年では被覆防食材にステンレス鋼やチタンといった金属製の材料が使用されることがある。波崎栈橋においても耐海水性のステンレス鋼を被覆材とした場合の電気防食特性の影響について検討がなされている⁹⁾。金属材料が鋼材と接触することで異種金属接触腐食が生じる可能性が考えられる。この異種金属接触腐食を防止するために電気防食は非常に有効であるが、設計段階から金属材料への流入電流を見込んだ設計が必要となるため、金属材料を用いた被覆材を後付けする場合には注意が必要である。また、波崎栈橋は高波浪環境海域下に位置しており、高頻度で高い位置まで波浪が作用するため、結果として防食対象面積が広くなり、流入する防食電流が大きくなる可能性が高い。そのため陽極の消耗が大きくなり、本来の設計寿命よりも短くなる可能性があるため、設計時における電気防食の対象範囲お

よび防食電流密度を設定する際には注意が必要となる。

8.1.6 まとめ

波崎観測栈橋における、一般の流電陽極方式電気防食（溶接による固定方法の場合）に関する調査より得られた知見を以下に示す。

- 1) 劣化度判定を現状の2段階より細分化することで、より早く陽極消耗時期を推測できる可能性が示された。ただし、しきい値の設定については、慎重な設定が必要である。
- 2) 電位計測の頻度については、防食対象物の置かれる環境や既設陽極の設置状況などを総合的に判断し、計測頻度を設定する必要がある。

8.2 流電陽極方式電気防食（磁石による固定方法の場合）

8.2.1 はじめに

現在の流電陽極の設置方法は、潜水士が水中でアーク溶接により取付ける方法が主流である。しかし、石油備蓄基地のように溶接機の持ち込みが極端に制限される火気厳禁の場所や防食対象物の周囲が狭く潜水士が入れないような場所では水中溶接を行うことが出来ず、流電陽極を設置することができない。

溶接が不要な取付け方法としてボルト固定による設置や磁石を用いた設置方法（以下、磁石式流電陽極）が古くから考案されてきた。磁石を用いた設置方法の場合、磁力のみの固定は限度があり、長期的な安定固定には不安が残るため、当初は100kg未満のような期待耐用年数が短い小型の陽極を対象としていたようである。また、磁石が接触する部分の鋼材の表面処理は、水中溶接の場合よりも平滑にする必要がある。このような課題があることから、磁石を用いた設置方法は、実用化に至っておらず広く普及していない。

近年では、コストは高いが磁力の強い磁石も普及してきている。この磁力の強いタイプの磁石式流電陽極の耐久性と防食性能の確認を目的として、2010年度からNo.24杭に磁石式流電陽極が取り付けられている⁷⁾。

8.2.2 調査概要

固定用のマグネットには希土類のネオジウムを使用した。38mm×30mm×12.7mmのマグネットを8個1組として陽極の心金部分にトレーに入れて2組固定した。トレーに入れたマグネットは心金両端を通る鋼製フラットバー上に固定された。写真-8.1にマグネットの取付け写真を示す。

実験室内では良好な結果を得たため、実海域における施工性、水中設置時の強度、流電陽極機能の発揮などの適用性を確認することを目的にNo.24杭の水深-1.0m付近に取付け試験を行った。写真-8.2にマグネットを用いて陽極を設置した状況写真を示す。



写真-8.1 フラットバー上に固定された磁石部



写真-8.2 磁石式流電陽極

8.2.3 調査結果

取付け時から約 3000 時間（約 4 か月）後までの電位経時変化を図-8.3 に示す。磁石式流電陽極の設置直後から電位は卑に分極した。部分的に電位が急激に貴化し防食電位を満足しない箇所があるが、これは台風や低気圧通過時に波高が高くなった時期を示している。しかし、波高が穏やかとなると電位は卑化し始める。鋼材が十分に分極しておらずエレクトロコーティング等が不十分な設置直後は、波高の上昇により防食対象面積も増加するため防食電流が不足し電位が貴化したものと考えられる。このように、電気防食の設置直後に海象の影響を受けやすい現象については、磁石式に限ったことではなく、一般の流電陽極の場合でも起こるものである。

2010 年度からの取り付け開始時から 5 年が経過するが、現状でも波浪等の影響により脱落、変形等の異常は認められていない。鋼材の電位も防食電位である -780mV 以下であり、良好な防食状態を保っていると言える。これは、設置当初から長期間経過したことで鋼材表面にエレクトロコーティングが生成し皮膜を形成したためと考えられる。近年における陽極の設計寿命は 30 年以上の長期耐用化が増加しているため、陽極の大型化やより長期間における検討が必須と考えられるため、早急な結論を出すのではなく、今後も経過観察が必要と考えている。

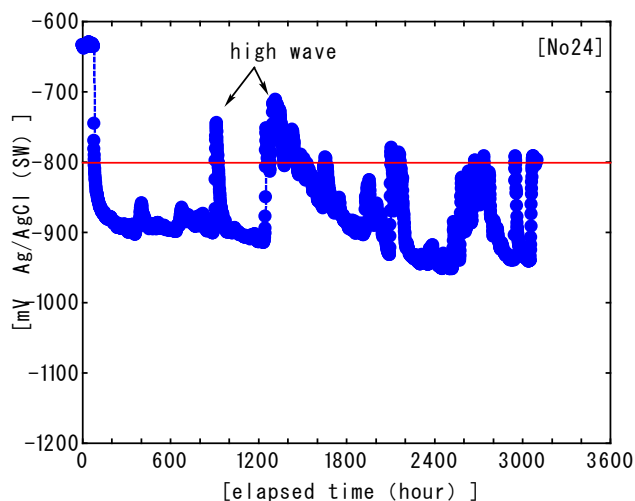


図-8.3 電位の経時変化 (No.24)

8.2.4 まとめ

流電陽極方式電気防食（磁石による固定方法の場合）に関する調査より得られた知見を以下に示す。

設置から 5 年経過後も脱落等は無く鋼材の電位も防食電位である -780mV 以下であり、良好な防食状態を保っている。

ただし、波浪の影響を受け、電位の値が変動している状況が確認されている。今後も長期間の経過観察が必要である。

参考文献

- 1) 宮田義一, 阿部正美, 濱田秀則, 清水一夫, 中野啓眞, 茶川博昭: 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, 2006.6.
- 2) (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), p.189, 2009.
- 3) 防食・補修工法研究会: 港湾鋼構造物防食工法の新しい維持管理技術読本, p.74, 2012.12.
- 4) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 小林浩之: 港湾鋼構造物の電位計測による電気防食管理手法に関する一考察, 材料と環境 2012, pp.313-316, 2012.
- 5) 国土交通省港湾局: 港湾の施設の点検診断ガイドライン, 2014.7.
- 6) 佐藤弘隆, 佐々木信博, 審良善和, 清水一夫, 山路徹, 阿部正美: 波浪海域における耐海水性ステンレス鋼被覆の電気防食特性, 防錆管理, Vol.57, No.11, pp.403-410, 2013.
- 7) 阿部正美, 金杉賢, 鬼沢良作, 山路徹, 審良善和, 吉田倫夫: 磁石を用いた流電陽極方式の陽極固定法に関する検討, 防錆管理, Vol. 55, No.12, pp.455-460, 2011.

9. まとめ

9.1 各工法に関するまとめ

各章で得られた知見については、各章にまとめられている。全体的に総括したまとめを被覆防食工法と電気防食工法に分けて以下に示す。

9.1.1 被覆防食工法

各章のまとめに記載されている内容を基に、まとめおよび課題について、一覧表として表-9.1にまとめた。以下、今回対象とした主な工法毎に概要を述べる。詳細については、各章のまとめを参照されたい。

(1) 塗装工法

今回、主な工法として、超厚膜エポキシ樹脂塗装工法について検討を行った。本工法は20年時には良好な防食状態であり、30年時も外観は健全であった。一方、塗膜中には徐々に塩分などが侵入し、塗膜の抵抗としては低下してきていることが確認された。

各種塗装工法の性能評価指標としては、インピーダンスが有用であることが確認された。

(2) 有機被覆工法（水中硬化形被覆工法）

20年時には良好な防食状態であったが、30年時には、外観上、一部に変状が見られた。また、塗膜性能においても、絶縁抵抗、塩化物イオンの侵入深さなどに

おいて、明確な低下が確認された。

本工法の性能評価指標としては、絶縁抵抗、塩化物イオンの侵入深さ等が有用であることが確認された。

(3) 有機被覆工法（ポリエチレン被覆工法）

20年時には良好な防食状態であり、30年時も健全であった。ただし、補修工法については、長期の耐久性を有する工法の開発が望まれる。

本工法の性能評価指標としては、体積固有抵抗（絶縁抵抗から算出）が有用であることが確認された。なお、30年までにおいて、値の低下は確認されたが、塗膜性能の限界値とされる値は上回っていた。

(4) ペトララム被覆工法

20年時には良好な防食状態であった。一方、30年時は、カバー材は概ね健全であったが、カバーを固定するボルトなどの付属品に劣化が確認された。また、カバー内の鋼材には、一部で軽微な腐食が確認された。

本工法の性能評価指標としては、油分残存率が指標として一般に用いられているが、測定精度が低い、本指標以外に劣化要因が有る等、課題が多いことが改めて確認された。

今後は、本被覆の劣化メカニズムについての検討を行い、性能評価方法を確立させる必要がある。

(5) 無機被覆（コンクリート被覆）

20年時には良好な防食状態であり、30年時も健全な状

表-9.1 主な被覆防食工法に関する調査結果まとめ

工法		20年時概要	30年時概要			性能評価指標の確立		課題
防食系	主な工法名		外観	詳細調査	総合評価	指標	適用性	
				結果				
塗装	超厚膜エポキシ樹脂	良好な防食状態 ・鋼材表面に腐食なし ・被覆材表面に軽度の チョーキング	健全	・インピーダンス(塗膜抵抗)が低下 ・塗膜内に塩分が浸透	現状では健全だが性能低下の兆候あり	インピーダンス(塗膜抵抗、付着性状、鋼材腐食まで評価)	○	測定精度向上
有機	ポリエチレン被覆	良好な防食状態 ・被覆材の外観に異状無 ・鋼材表面に腐食無し	健全 (補修工法検討部は除く)	・体積固有抵抗が低下(ただし限界値以上)	健全 (補修工法検討部は除く)	体積固有抵抗(被覆材の健全度を評価)	○	・測定精度向上 ・補修工法の確立
	水中硬化形被覆	良好な防食状態 ・被覆材の表面に中程度のチョーキング ・鋼材表面に腐食無し	一部で変状有	・塗膜性能(絶縁抵抗等)が低下し、腐食が開始	塗膜性能が低下し、腐食が開始	絶縁抵抗、塩化物イオン浸透深さ、付着力(被覆材の健全度を評価)	○	測定精度向上
ペトララム	FRPカバー、チタンカバー、PEカバー	良好な防食状態 ・カバー材に異状無し ・鋼材表面に腐食無し	・カバー材は概ね健全 ・付属品等に劣化が確認	・一部に軽微な腐食発生 ・油分残存率は一部で低下。ただし傾向は不明確。	概ね健全	油分残存率(測定精度低、本指標以外に劣化要因が有る等、課題が多い)	△	劣化メカニズムの確立
無機	コンクリート被覆	良好な防食状態 ・外観に異状なし ・鋼材表面に腐食無し	健全	高濃度の塩化物イオンが浸透しても鋼材腐食無し(21年経過時)	健全	塩化物イオン(鋼材界面から浸透、高濃度でも腐食無し等、課題が多い)	△	鋼材腐食発生メカニズムの確立

態であった。

本工法の性能評価指標としては、一般に塩化物イオンが考えられている。この塩化物イオンは、コンクリート表面から徐々に浸透すると想定されているが、それだけでなく、コンクリートと鋼材の界面から浸透が見られた。また鋼材表面の塩化物イオンが高濃度となっても腐食が生じていない場合が多いことが確認された。このように、塩化物イオンを指標とする際には課題が多いことが確認された。

今後は、腐食発生メカニズム、塩化物イオンの浸透メカニズムなどを検討する必要がある。

9.1.2 電気防食工法（流電陽極方式）

(1) 一般（溶接による固定方法）の場合

劣化度判定を現状の2段階より細分化することで、より早く陽極消耗時期を推測できる可能性が示された。ただし、閾値の設定については、慎重な設定が必要である。

電位計測の頻度については、防食対象物の置かれる環境や既設陽極の設置状況などを総合的に判断し、計測頻度を設定する必要がある。

(2) 磁石による固定方法の場合

設置から5年経過後も脱落等は無く鋼材の電位も防食電位である -780mV 以下であり、良好な防食状態を保っている。ただし、波浪の影響を受け、電位の値が変動している状況が確認されている。今後も長期間の経過観察が必要である。

9.2 今後の対応

30年の長期にわたり、防食性能を発揮している工法が多数存在した。今後も試験を継続することで、より長期の耐久性評価が可能となる。その成果は、期待耐用年数¹⁾の評価の際の参考資料になり得る。

性能評価手法に関しては、工法によって、評価の際の指標となり得るパラメータが抽出できたものと、現状では課題の多いものに分かれた。1.でも述べたように、被覆防食工法に対して求められている、性能評価手法および将来予測方法の確立に向けて、各工法毎に、以下のような取り組みを想定している。今後も継続して検討を行い、手法の確立を実現したいと考えている。

なお、波崎観測栈橋のみの調査結果では普遍的な知見とは言い難いため、一般の港湾鋼構造物での調査結果と比較検討しながら、評価指標の適用性の検討を行っていく必要があると考えている。

1) 塗装工法、有機被覆工法については、評価の際の指標となり得るパラメータが抽出できた。今後は継続的な

計測を行い、さらにデータを蓄積し、精度の向上を図る必要がある。また、補修工法およびその実施時期の判断基準の提示も必要である。

- 2) ペトラタム被覆工法については、性能評価の指標と考えられていた「油分残存率」に関して、①測定精度が低い、②本指標以外に劣化要因が有る等、課題が多いことが改めて確認された。今後、詳細な検討を別途行い、防食メカニズムの解明、性能評価手法の確立を行う必要がある。
- 3) 無機被覆工法（コンクリート被覆工法）については、性能評価の指標と考えられていた「塩化物イオン」による評価が困難であることが示唆された。本検討を行うに当たっては、室内試験レベルでは実際の現象を再現していない可能性が高く、ある程度規模の大きな試験体を作成し、鋼材腐食の発生、進展のメカニズムを解明する必要があると考えている。
- 4) 電気防食工法（流電陽極方式）については、劣化度評価の高度化が期待されており、今回、試行的に検討を行った。ただし、まだ課題は多く、波崎観測栈橋だけでなく、他の実構造物での結果も踏まえ、更なる検討を行う必要がある。

(2016年1月25日受付)

謝辞

本研究は、2010年度までは港湾空港技術研究所、沿岸技術研究センター、鋼管杭・鋼矢板技術協会（当時は鋼管杭協会）との三者の共同研究として実施し、2011年度以降は、（国研）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、（株）金杉商工、関西ペイント（株）、（株）ナカボーテック、日鉄住金防蝕（株）、日本防蝕工業（株）、日本冶金工業（株）、吉川海事興業（株）との共同研究により実施した。関係者の皆様へ厚くお礼申し上げます。特に、開始当初から20年以上にわたり携われた、故清水一夫氏（当時、日本防蝕工業（株））に御礼申し上げます。

また、試験の実施においては、波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋を使用させていただいている。この栈橋の所有者である、沿岸土砂管理研究チーム（試験開始当時は漂砂研究室）の皆様には多大なるご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) （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）、p.59, 2009.

港湾空港技術研究所資料 No.1324

2016.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています