

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1123 June 2006

鋼管杭の防食工法に関する現地試験
(20年目の中間報告)

宮 田 義 一
阿 部 正 美
濱 田 秀 則
清 水 一 夫
中 野 啓 眞
芥 川 博 昭

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 緒言	4
1.1 現地試験に用いた栈橋の概要	5
1.2 栈橋の置かれた環境	6
2. 現地試験の概要	10
2.1 試験に使用した防食工法	10
2.2 試験実施概要	14
3. 試験結果および考察	25
3.1 飛来海塩粒子	25
3.2 無防食鋼管杭の腐食傾向	27
3.3 電気防食工法	28
3.4 被覆防食工法	41
3.5 試験開始から10年未満の防食工法	58
3.6 試験結果と考察のまとめ	62
4. 試験結果を反映した新たな技術提案	64
4.1 電気防食工法	64
4.2 被覆防食工法	65
5. 結語	68
謝辞	68
参考文献	69
付録	70
付録A 参考資料	71
付録B 写真集(本文中に掲載した白黒写真のカラー版)	80
付録C 各種防食工法の施工仕様	87
付録D 各種防食工法の外観写真	128

Long-term Field Test for Corrosion Protection of Steel Pipe Piles (Interim Report for 20-year Exposure Test)

Yoshikazu MIYATA*

Masami ABE**

Hidenori HAMADA ***

Kazuo SHIMIZU****

Hiromasa NAKANO****

Hiroaki AKUTAGAWA *****

Synopsis

Steel pipe piles have been widely used as the structural materials for marine steel structures. Various kinds of corrosion protection methods have been applied to prevent these steel structures from corrosion. The main objective of this study is to investigate the protective effectiveness and durability derived from various kinds of corrosion protection methods for steel structures.

A large-scale and long-term field exposure test for steel pipe piles has been carried out. The field test facility applied is a 427-m long pier extending perpendicular to the shoreline into the sea of Kashima-nada at Kamisu, Ibaraki Prefecture, Japan. The pier is constructed using 47 steel pipe piles that are protected by means of protective coating and cathodic protection.

The following results have been obtained from the field test conducted for about twenty years.

- (1) Protective effectiveness has been maintained for 20 years as to the following corrosion-protection methods: epoxy mastic coating, polyethylene coating, underwater cured coating, epoxy mastic system, electrodeposition method, reinforced concrete system with the underwater welding-stud, and petrolatum coating (titanium, polyethylene and FRP covering system).
- (2) The sacrificial anode cathodic protection is effective in preventing corrosion of steel in the tidal zone and sand erosion-corrosion.
- (3) The current generated from an anode decreased rapidly when steel is polarized to -900 mV (Ag/AgCl-EL), which is less than the protective potential (-780 mV). The decrease of the current results in a prolonged service life of the anode.

Key Words: marine environment, steel structure, steel pipe pile, protective coating, cathodic protection, corrosion

* Researcher, Materials Division, Geotechnical and Structural Department

** Former Senior Researcher, Materials Division, Geotechnical and Structural Department

*** Director of Materials Division, Geotechnical and Structural Department

**** Technical member, Japanese Association for Steel Pipe Piles

***** Researcher, Coastal Development Institute of Technology

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

Phone : +81-46-8445061 Fax : +81-46-8440255 e-mail : miyata-y@pari.go.jp

鋼管杭の防食工法に関する現地試験

(20年目の中間報告)

宮田 義一*
阿部 正美**
濱田 秀則***
清水 一夫****
中野 啓眞*****
芥川 博昭*****

要 旨

鋼管杭は海洋構造物の部材として広く用いられており、鋼管杭を防食するために、様々な防食工法が適用されている。茨城県神栖市にある波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋の鋼管杭に、各種防食工法を適用して1984年から開始した試験は、毎年現地試験を重ね2004年度で20年目を迎えた。本資料は20年間の暴露に耐えた、各種防食工法の耐久性および防食効果等の詳細試験結果を中間報告としてまとめたものである。試験は現在も継続中であるが、この暴露試験研究から得られた主な点をあげると以下のようになる。

- (1) 次にあげる被覆防食工法は、20年間、防食効果が維持されていた。
超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法、ポリエチレンライニング工法、水中硬化型ライニング工法、
極厚マチック防食工法、電着工法、CRUS工法、ペトロラタムライニング工法(チタンカバー工法)、ポリエチレン樹脂カバー工法、FRP樹脂カバー工法)
- (2) 流電陽極方式の電気防食工法は、干満帯の防食にも効果があり、またサンドエロージョンの防止効果も期待できる。
- (3) 鋼材の電位を防食電位(-780mV 銀塩化銀電極基準)よりも卑値な-900mVまで分極した場合、陽極からの発生電流は顕著な低減が認められた。したがって、鋼材の電位を-900mV以下とすれば陽極の寿命が延命される。

キーワード：海洋環境、鋼構造物、鋼管杭、被覆防食、電気防食、腐食

* 地盤・構造部 材料研究室 研究官
** 前 地盤・構造部 材料研究室 主任研究官
*** 地盤・構造部 材料研究室長
**** 鋼管杭協会 技術委員
***** 財団法人 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
TEL : 046-844-5061 Fax : 046-844-0255 e-mail : miyata-y@pari.go.jp

1. 緒言

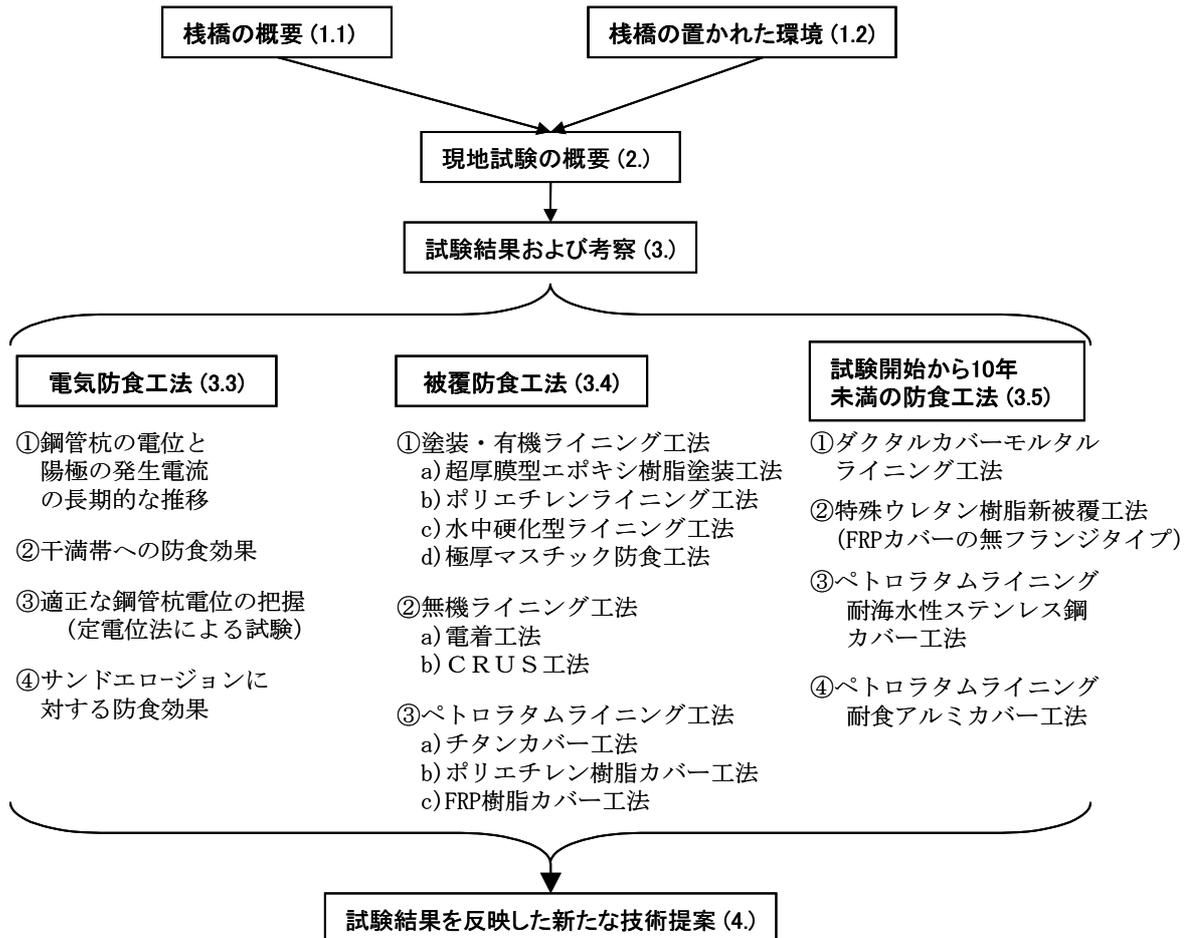
本現地試験が開始された 20 年前は防食対策の必要性について、関係者の間で最も認識が高まった時代である。この時代に多くの防食工法が開発されたが、耐久性や防食効果を適切に評価する場所を与えられていなかったのが実状であった。そこで、各種防食工法の長期にわたる耐久性や防食効果を評価することを目的として、茨城県鹿島郡波崎町(現 神栖市須田浜地先)の海岸線に位置する波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋の鋼管杭 47 本に各種防食工法を適用して現地試験を開始した。

20 年間という長期にわたる現地試験を継続することによって各種防食工法の耐久性や防食効果に関する貴重なデータを得ることができた。また、試験期間中に多くの新材料や新技術が試され、その中には実用化に供する技術や材料も誕生した。さらに、現地における施工に関する資料を得ることや、試験途中で劣化が生じた場合の補修工法の適

用性についての検討も試みた。そのため、実構造物による 20 年間の長期現地試験は関係技術者にとっては多くの研鑽の場にもなった。

本資料は 20 年間の暴露現地試験に供された各種防食工法の耐久性および防食効果等に関する試験を 2004 年度に実施し、その試験結果を中心に取りまとめたものである。

本資料では、図-1.1 に示す構成の流れに沿って内容を述べる。まず本章では、試験に使用した栈橋の概要および栈橋が置かれている環境について述べる。第 2 章では、試験に使用した防食工法の特徴について概説した後、試験方法の概要を説明する。第 3 章では、本資料の根幹である試験結果および考察について述べる。内容は、電気防食工法と被覆防食工法に分けて記述しており、さらに試験期間が 10 年に満たない防食工法の結果についても記載している。最後に第 4 章では、本研究で得られた試験結果を踏まえて、防食技術に関する提案をする。



()内は、掲載されている章および節を表わす

図-1.1 本資料で取上げる防食試験に関する主要な内容

1.1 現地試験に用いた栈橋の概要

現地試験に用いた栈橋の正式名称は「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）」と言い、1982年～1985年にかけて建設された研究施設である¹⁾。

この栈橋の主な研究目的は、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。栈橋が設置された場所を図-1.2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いに突き出ている。



図-1.2 栈橋の位置図

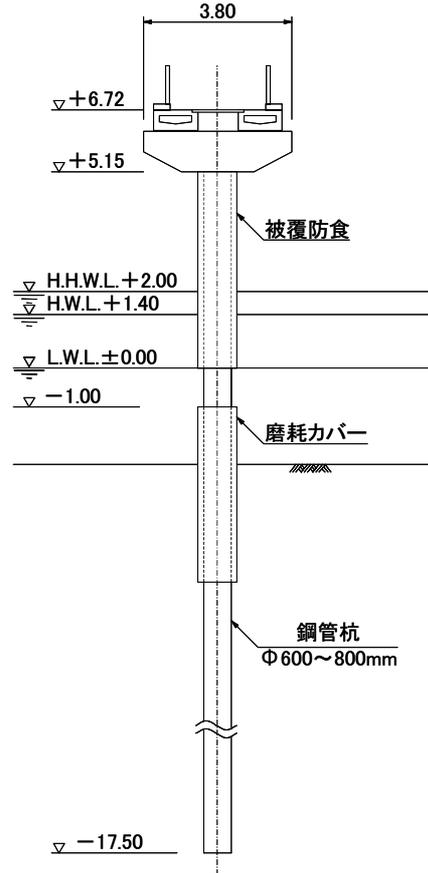


図-1.4 栈橋の標準断面図

栈橋の全体図を図-1.3に、標準断面図を図-1.4に示す。

図-1.3の断面図の下に示した数字は鋼管杭No.を表わす。

栈橋の全長は 427m、陸側先端は砂浜に位置し、沖合い先端の水深は約-5mである。図-1.4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-1.5に示す。栈橋の海側は、北から東側に 59° の方向である。

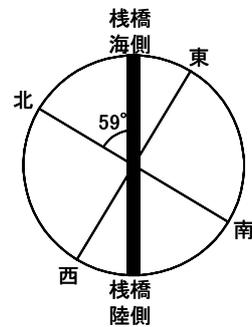


図-1.5 栈橋の方位

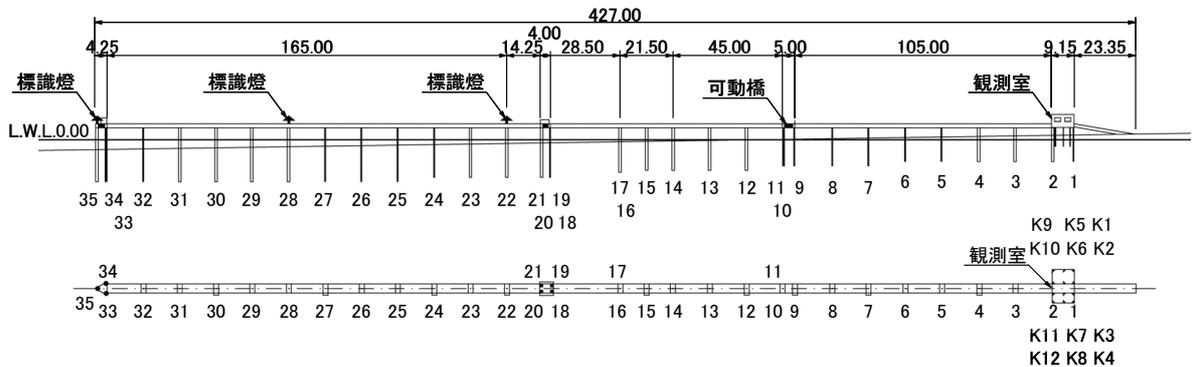


図-1.3 栈橋の全体図

1.2 栈橋の置かれた環境

(1) 碎波帯

海岸に打ち寄せてくる波は、水深の減少につれて波としての形が保てなくなり、ついには砕けて白波となって前進する。この波が砕ける場所から波が最後に浜に達するまでの範囲を碎波帯 (Surf Zone) とよぶ。

写真-1.1 は、穏やかな時の (鹿島港での有義波高 0.6m, 有義波周期 8.3s) 碎波帯であり、陸側の 5 分の 1 程度が碎波帯の範囲である。一方、写真-1.2 は、荒天時の (鹿島港での有義波高 2.13m, 有義波周期 9.7s) 碎波帯である。碎波は栈橋先端よりも沖側から生じており、白くなった部分が岸沖方向に 3 列になっていることから、碎波は 3 ヲ所で発生していることが分かる。



写真-1.1 静穏時の波崎海洋研究施設
(2000年5月30日) (写真-B.1参照)

(2) 風向・風速

図-1.6 は、栈橋先端の高さ+10m 地点で毎時に観測された 1987 年 3 月から 1988 年 2 月までの平均風速・風向の風配図である。多く発生する風向は、北～北東および南南西方向である。風速は、10m/s までの発生頻度が高く、強風 (15m/s 以上) は、北および北北東方向で発生する。

図-1.7, 1.8, 1.9, 1.10 に季節別の風配図を示す。冬期に頻度が多い風向は、西北西および西からの季節風である。ただし、風速は 10m/s 以下がほとんどである。春期は、低気圧の通過に伴う北～北東および南、南南西方向の発生頻度が高い。夏期は、南、南南西方向の発生頻度が高いものの、風速は 10m/s 以下がほとんどである。秋期は、台風・低気圧の通過に伴う、北～北東方向の風の発生頻度が高く、15m/s 以上の強風も多数発生している。



写真-1.2 荒天時の波崎海洋研究施設
(2001年9月24日) (写真-B.2参照)

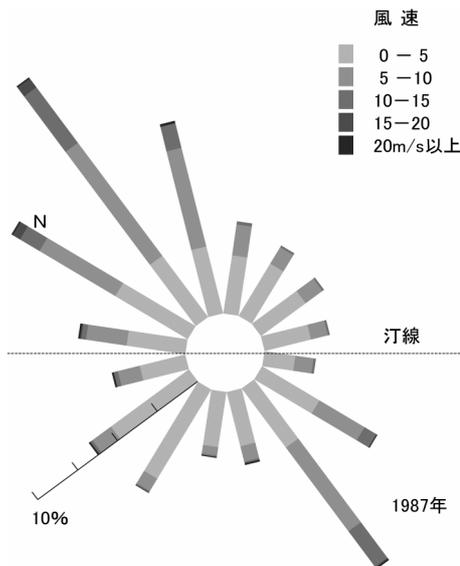


図-1.6 1987年の風配図 (1987年3月～1988年2月)

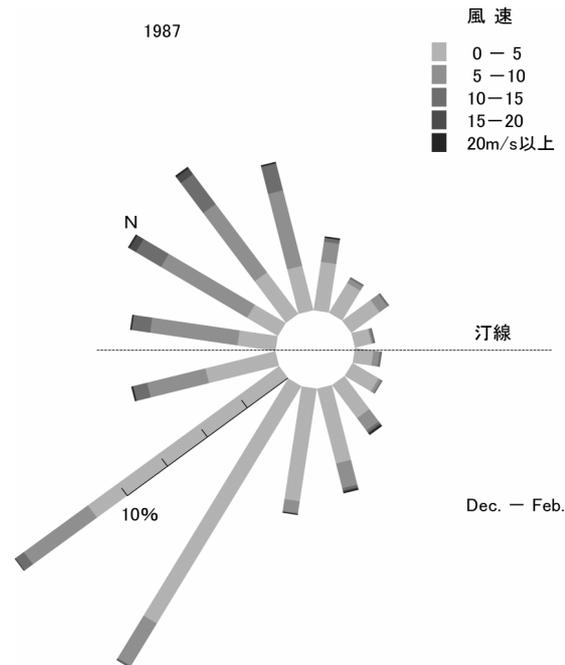


図-1.7 1987年冬の風配図 (12月～2月)

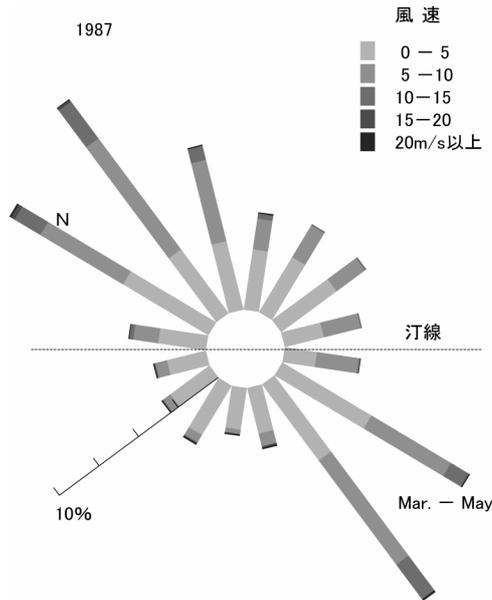


図-1.8 1987年春の風配図(3月～5月)

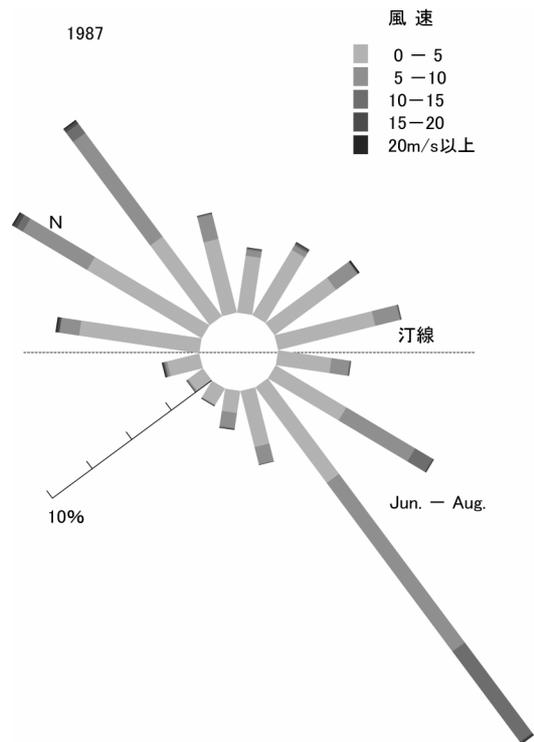


図-1.9 1987年夏の風配図(6月～8月)

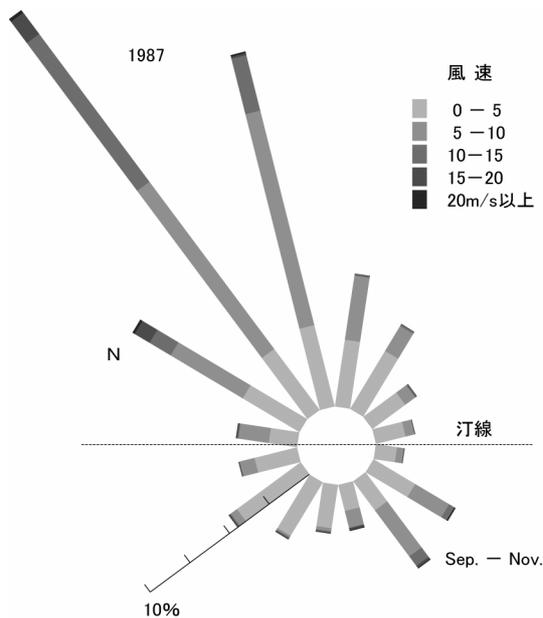


図-1.10 1987年秋の風配図(9月～11月)

(3) 潮位 (平均水位)

図-1.11に、1987年3月～1988年2月に栈橋先端で観測された(1時間毎に、正時をはさむ20分間)平均水位の経時変化を示す。これによると、大潮時の潮位差は約1.5mであり、日潮不等が存在し、その結果潮位の高い時間帯が多くなっていることが分かる。また、潮位は4、5月に最も低く9、10月に向かって上昇している。9月に一時的に平均水位が高くなっているのは、1987年の台風13号が通過した時である。

(4) 波浪

図-1.12は、1987年に2時間おきに測定した鹿島港での有義波高と栈橋先端有義波高との関係を示している。鹿島港の有義波高は0.3～5.9mまで広い範囲に分布している。しかし、栈橋先端の有義波高は3.0mを超えることはない。これは、栈橋先端の水深が5～6mであるため、大きな波高の波は栈橋よりもさらに沖で砕波するためである。ただし、波高は小さくても、砕波地点付近では、巻波砕波となり、鋼管杭に衝撃的な力を及ぼす場合もある。

図-1.13は、栈橋先端における有義波高の季節別、波高別発生頻度を示している。波高が小さいのは、夏期および冬期であり、春期は、それよりもやや波高が大きい。そして、図-1.10に示した海から(北～北東)の強風発生頻度の高い秋期に高波浪が多く発生している。

(5)流れ

流れは、観測棧橋に沿って、休日を除く1日1回、約20m間隔で浮き（フロート）によって観測している¹⁾。図-1.14は、年間を通じ発生頻度の多い、穏やかな海象条件(鹿島港の有義波高0.95m, 周期4.8s, 写真-1.1のような状況)の時の測定結果である。この時の砕波帯は145~130mであるとともに波向は汀線に直角方向よりもやや銚子側から入射していた。そのため、波が砕けることによって発生する鹿島方向に向かう流れ(海浜流)が115m地点よりも陸側で生じている。一方、砕波帯よりも沖側では、この海域の海流と考えられる鹿島方向への遅い流れが生じている。ただし、

波向および海流の向きによっては、砕波帯内とその沖側で流れの方向が逆転するケースもしばしば発生する。

図-1.15は、2005年台風7号通過時(鹿島港有義波高3.07m, 周期10.5s)の流れの測定結果である。この時、波は汀線に直角方向よりも20度銚子側から入射するとともに、棧橋よりも沖で砕波が始まり、95m地点までが砕波帯になっていた(写真-1.2のような状況)。そのため、棧橋全域にわたって鹿島方向への速い流れ(最大2.32m/s)が生じている。今までの最大流速は、1986年9月2日に観測した3.28m/sである。

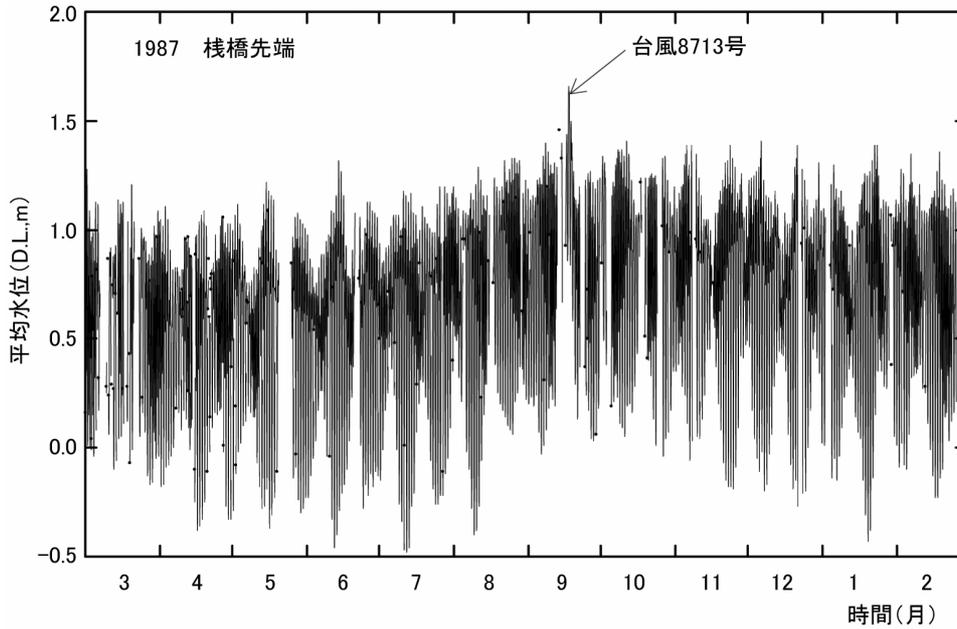


図-1.11 波崎海洋研究施設棧橋先端の平均水位 (1987年3月~1988年2月)

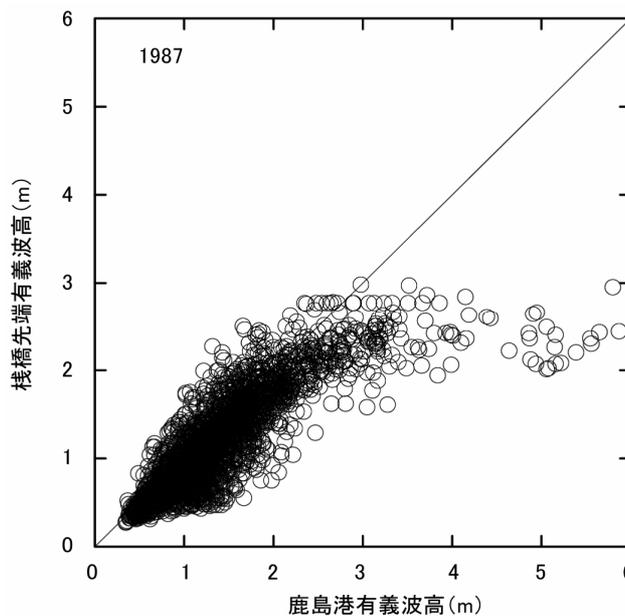


図-1.12 鹿島港有義波高と棧橋先端有義波高の関係 (1987年)

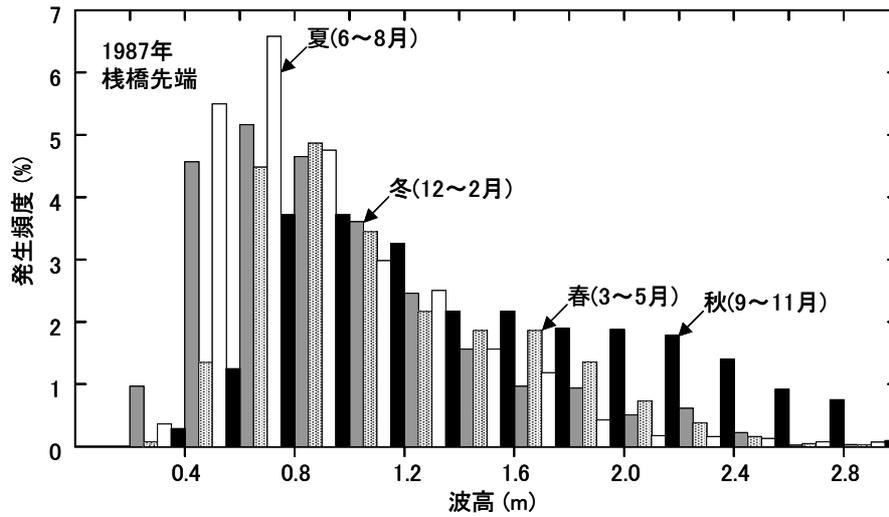


図-1.13 棧橋先端有義波高の季節別発生頻度 (1987年)

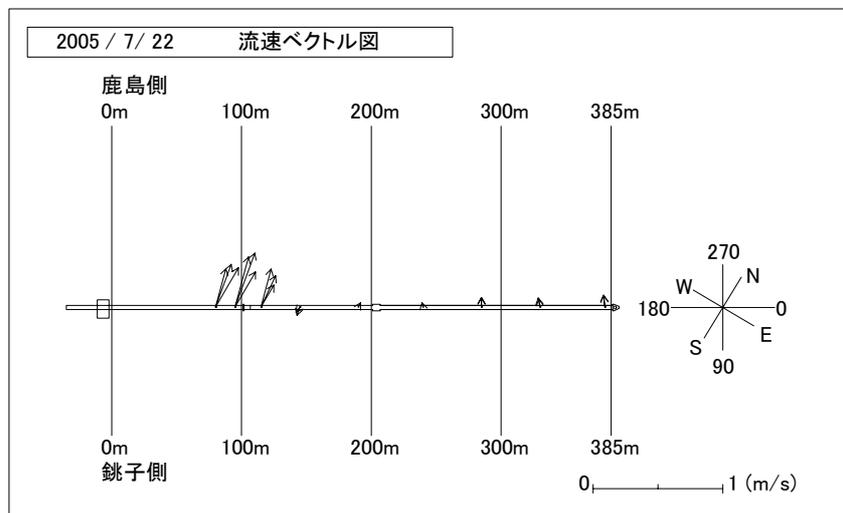


図-1.14 静穏な時の流れの測定例 (2005年7月22日)

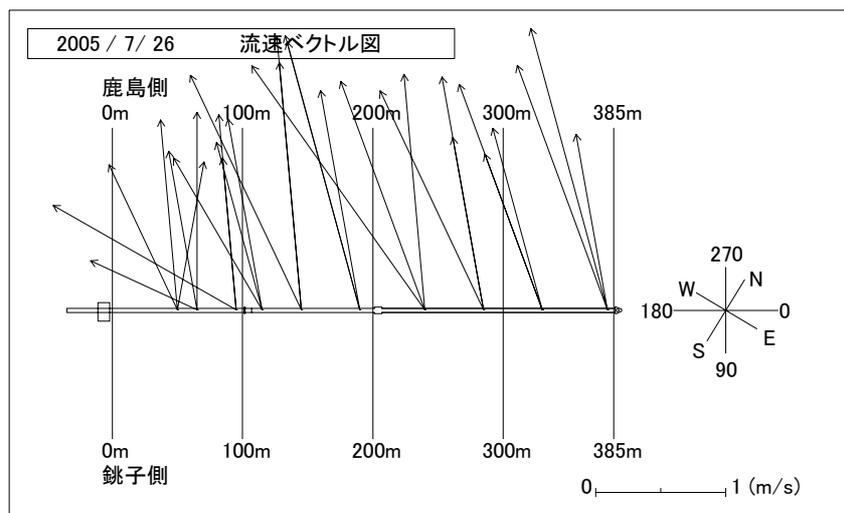


図-1.15 台風0507号通過時の流れの岸沖分布 (2005年7月26日)

2. 現地試験の概要

2.1 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て、1984年（昭和59年）～2004年（平成16年）まで、20年にわたり毎年現地試験を重ねてきており、今後も継続する予定である。試験を実施した防食工法の一覧を表-A.1（以下本文中の表-A.〇〇は付録A参照）と表-A.2に示す。この中には、20年間試験を継続した防食工法、20年の間に研究目的を終了した防食工法、新たに追加した防食工法、および無防食状態のまま暴露した鋼管杭が含まれている。

本資料では、主に20年間試験を継続した防食工法について、その試験結果を報告する。これらの防食工法および適用鋼管杭を表-2.1に示す。同表に示すように防食分類としては、塗装・有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペโตรラタムライニング工法、電気防食工法の4種類に分けられる。

塗装・有機ライニング工法では、超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法、ポリエチレンライニング工法、水中硬化型ライニング工法、極厚マスチック防食工法の4種類を試験対象とした。無機ライニング工法では、電着工法とCRUS工法の2種類、ペโตรラタムライニング工法では、チタンカバー工法、ポリエチレン樹脂カバー工法、FRP樹脂カバー工法の3種類の工法を対象としている。

電気防食工法はアルミニウム合金陽極による流電陽極方式を対象とした。

次に、20年経過以前に試験を終了した防食工法を表-2.2に示す。塗装・有機ライニング工法では被覆材の各種の有機高分子材料に工夫を凝らした10種類の工法が目的を達成したため試験を終了した。また無機ライニング工法では、セメントモルタル/FRPカバー工法とGRC補強カバー工法の2種類の工法が、ペโตรラタムライニング工法も4種類の工法が研究の目的を達成したため、試験を終了した。

新たに追加した防食工法を表-2.3に示す。塗装・有機ライニング工法では、防食層に特殊ウレタン樹脂を用いた、特殊ウレタン樹脂新被覆工法を追加した。無機ライニング工法では新しい複合材料としてのセメント系のダクトルを用いたダクトルカバーモルタルライニング工法と、耐食性に優れたチタンシートを保護カバーとして用いたチタンカバーモルタルライニング工法の2種類を追加した。また、ペโตรラタムライニング工法ではポリエチレン同士を熱融着で一体化してフランジ部を無くしたポリエチレンカバー工法、耐食性に優れた金属を保護カバーに用いた耐海水性ステンレス鋼カバー工法と、耐食アルミカバー工法、チタンカバー工法、アクリル変性塩化ビニールを保護カバーとして用いたアクリル変性塩化ビニールカバー工法、FRPを保護カバーとして用いたFRP樹脂カバー工法の6種類の工法が新たに試験に加わった。新工法は全部で9種類となり、今後の研究成果が期待される。

干満帯から飛沫帯の範囲を無防食状態で暴露した鋼管杭を表-2.4に示す。無防食状態が20年に満たないものは、途中で追加実施した防食工法を適用した鋼管杭である。

以下、本資料で取り上げる防食工法について概説する。

表-2.1 試験に使用された防食工法および適用杭

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

表-2.2 試験目的を達成して試験を終了した防食工法および適用杭

防食分類	工法名	鋼管杭 No.
塗装・有機ライニング工法	防食シート接着ライニング工法	1, 2
	水中硬化型ライニング工法	5, 15
	防食テープ FRP カバー工法	21
	ガラスフレークポリエステル樹脂塗装工法	K1
	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	K4, K8, K12
	厚膜型無機ジンク/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗装工法	K5
	タールエポキシ樹脂塗装工法*	K6, K7
	水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗装工法	K9
	ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗装工法	K10
湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法	K11	
無機ライニング工法	セメントモルタル/FRP カバー工法	4, 8, 20
	GRC 補強カバー工法	17
ペトロラタムライニング工法	ペトロラタム防食工法 (FRV 工法)	13, 14
	ペトロラタム防食工法 (PTC-N 工法)	19
	ペトロラタム防食工法 (PTC-A 工法)	22
	一体成型防食工法 (A 法)	25
金属溶射工法	フレーム溶射, アーク溶射, MS 工法, 亜鉛メッキ	栈 100 栈 300

* 鋼管杭協会単独で継続して調査中

表-2.3 新たな研究目的として加わった新工法および適用杭

防食分類	工法名	鋼管杭 No.
有機・被覆ライニング工法	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	21
無機ライニング工法	ダクタルカバーモルタルライニング工法	2
	チタンカバーモルタルライニング工法	16
ペトロラタムライニング工法	ポリエチレンカバー工法	3
	耐海水性ステンレス鋼カバー工法	5
	アクリル変性塩化ビニールカバー工法 (APC カバー工法)	16
	FRP 樹脂カバー工法 (PTC-AX 法)	19
	耐食アルミカバー工法	20
	チタンカバー工法 (TP 工法)	25, 29

表-2.4 無防食状態の鋼管杭

鋼管杭 No.	無防食の範囲(m)	無防食の期間(年)	
		開始年	終了年
3	±0.00 ~ +5.15	1984	1998
16	±0.00 ~ +5.15	1984	1997
23	±0.00 ~ +5.15	1984	2004
26	±0.00 ~ +5.15	1984	2004
29	+2.00 ~ +5.15	1984	1997
30	±0.00 ~ +5.15	1984	2004

(1)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気的に接続して、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。

本試験では表-2.5 に示す流電陽極方式を対象とし、20年間という長い時間をかけて、2.2(1)で述べるような各種の試験を試みた。

(2)被覆防食工法

被覆防食工法は、海洋鋼構造物の鋼材表面を各種の防食材で被覆遮断することにより防食する方法である。

被覆防食工法は塗装工法、有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペトロラタムライニング工法の4種類に大別される。塗装工法と有機ライニング工法は、材料および施工方法において共通点が多いので、ここでは1つにして塗装・有機ライニング工法とする。

a) 塗装・有機ライニング工法

塗装・有機ライニング工法は、有機高分子材料を鋼材表面に被覆し、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-2.6 に示すように SIS-Sa2.5 である。以下に塗装・有機ライニング工法のうち、本栈橋に適用した工法について説明する。

a-1) 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. K2 と K3 に超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法を適用した。表-C.64（以下本文中の表-C.〇〇は付録C参照）に鋼管杭 No. K2、表-C.65 に鋼管杭 No. K3 の仕様等を示す。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。

表-2.5 試験に使用された電気防食工法および適用杭

鋼管杭 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。

表-2.6 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	SIS-Sa2.5	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。

SIS : Svensk Standard SIS 05 5900-1967

a-2) ポリエチレンライニング工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. 31, 32, 33, 34, 35 にポリエチレンライニング工法を適用した。これらの鋼管杭の仕様等を表-C.52～表-C.56 に示す。ポリエチレンライニング工法は、図-2.1 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。

a-3) 水中硬化型ライニング工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. 18 に水中硬化型ライニング工法を適用した。鋼管杭 No. 18 の仕様等を表-C.30 に示す。水中硬化型ライニング工法は、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。

a-4) 極厚マスチック防食工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. 27, 28 に極厚マスチック防食工法を適用した。鋼管杭 No. 27, 28 の仕様等を表-C.47 と表-C.48 に示す。極厚マスチック防食工法は、型枠を鋼管杭の防食範囲の外周に組立て、型枠内部に粘度の高いエポキシ樹脂を圧入する工法である。耐波浪性および耐衝撃性に優れ、密着性が高く耐久性に優れているなど、海上大気中から海水中の広い範囲を対象とする防食工法である。

b) 無機ライニング工法

無機ライニング工法は、セメントモルタルやコンクリート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。無機ライニング工法の素地調整は、塗装・有機ライニング工法と異なり、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第3種ケレン程度で良いとされており、一般的に、高压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、本資料で取り上げる工法について、具体的に述べる。

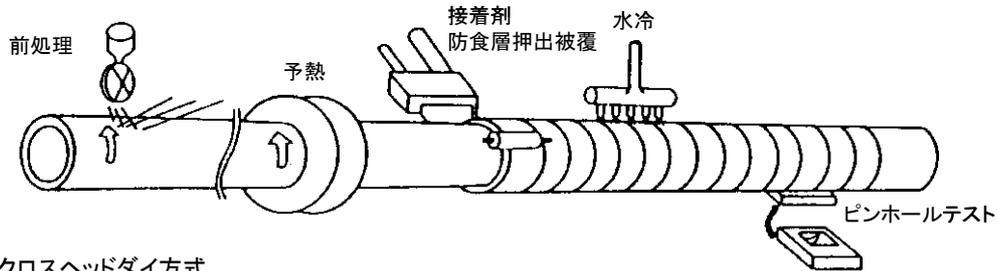
b-1) 電着工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. 9, 10, 11 に電着工法を適用した。表-C.15 に鋼管杭 No. 9, 表-C.18 に鋼管杭 No. 10, 表-C.20 に鋼管杭 No. 11 の仕様等を示す。電着工法では、陸上に電源室を仮設し、海水中の防食対象とする鋼管杭(約28m²)の周囲に電極を設置して、直流電源から3.5～6.0Vの電圧と12～30Aの電流を約3ヵ月程度通電し、海水に含まれるカルシウムイオンやマグネシウムイオン等を、無機系の電着物として鋼管杭に強固に付着させる。電着工法はコンクリートのひび割れ等の補修法としても有効な工法であり、海洋鋼構造物の防食以外の目的にも応用が期待される工法である。

b-2) CRUS 工法

表-2.1 に示すように、鋼管杭 No. 29 にCRUS工法を適用した。鋼管杭 No. 29 の仕様等を表-C.49 に示す。CRUS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

●Tダイ方式



●クロスヘッドダイ方式

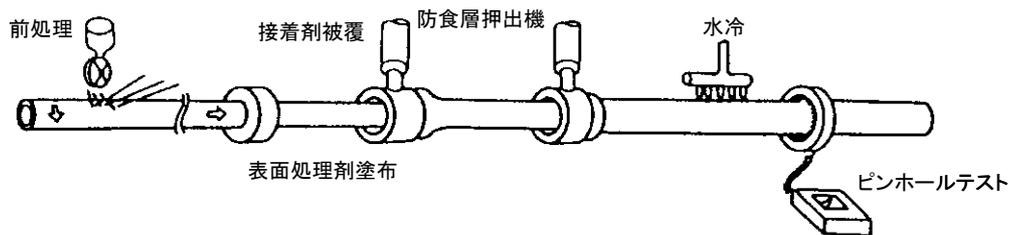


図-2.1 ポリエチレンライニング鋼管杭の製造の様子

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。

CRUS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工法で、防食と補強を兼ねた工法である。

c) ペトラタムライニング工法

本工法の防食材として用いるペトラタムは、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。原料のペト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。

素地調整は無機ライニング工法と同様に、第3種ケレン程度である。以下に、本栈橋に適用した各工法について述べる。

c-1) チタンカバー工法

表-2.1に示すように、鋼管杭 No. 6 にチタンカバー工法を適用した。鋼管杭 No. 6 の仕様等を表-C.9に示す。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。

c-2) ポリエチレン樹脂カバー工法

表-2.1に示すように、鋼管杭 No. 14 にポリエチレン樹脂カバー工法を適用した。鋼管杭 No. 14 の仕様等を表-C.24に示す。ポリエチレン樹脂カバー工法は、ポリエチレン樹脂の特徴を活かし、平板ポリエチレンカバーの端部が重なるように鋼管杭に巻き付け、接合部を熱融着で固定装着させる工法である。フランジ部がなく、またカバー厚さを4.5mmとすることで耐衝撃性を高めている。

c-3) FRP樹脂カバー工法

表-2.1に示すように、鋼管杭 No. 12, 19, 22, 24, 25 にFRP樹脂カバー工法を適用した。鋼管杭 No. 12 の仕様等を表-C.21に、No. 19 は表-C.32に、No. 22 は表-C.39に、No. 24 は表-C.43に、No. 25 は表-C.44に示す。FRP樹脂カバー工法は、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。

2.2 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。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。また被覆防食工法では、塗装・有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペトラタムライニング工法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。

以下に各試験の目的と概要を(1)電気防食工法と(2)被覆防食工法に分けて記述する。本節では概ね20年間、試験が継続されている防食工法について取り上げる。

(1) 電気防食工法

電気防食工法における検討課題を図-2.2に示す。検討課題は、①鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移、②干満帯への防食効果、③適正な鋼管杭電位の把握(定電位法による試験)、④サンドエロージョンに対する防食効果、である。

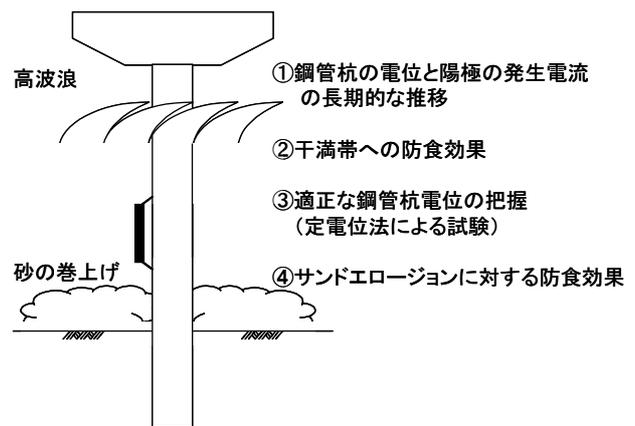


図-2.2 電気防食工法の検討課題

a) 鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移

本栈橋は一般の港湾区域と異なり、波浪が大きいなど防食にとって厳しい環境条件下にある。このような環境における電気防食の効果を調べるために、鋼管杭の電位と陽極の発生電流を長期的に測定し、検証した。

鋼管杭の電位は、亜鉛照合電極、飽和甘汞電極または海水銀/塩化銀電極を用いて測定した。またアルミニウム合金陽極の発生電流は、陽極に取り付けた0.01Ωのシャント抵抗(50mV, 5.0A)の電圧降下(IR)を測定して求めた。試験期間によって測定機器が異なるので、それらを表-2.7に整理した。

試験開始から 1988 年までは、鋼管杭の電位とアルミニウム合金陽極の発生電流を、電位差計あるいはチャート式記録計 (EPR) を用いて年間 5~6 回測定した。その結果、海象状況によって電位、電流ともに大幅に変動することが明らかになったので、1988 年からはアナログ式のレコーダーによる連続測定を開始し、海象状況との関係を調査した。海象条件は、主に有義波高、潮位、海底面高とし、その相関性について検証した^{2, 3)}。記録用紙によるデータの整理には、非常に長時間を要していたが、デジタル式データロガーが普及したので、1993 年からはこれを用いて連続測定を行った。測定値は、各鋼管杭から立ち上げた計測用ケーブルを栈橋上にある測定小屋まで引き込み、データロガーに記録した。

表-2.7 には電位の測定位置も示す。試験当初から 1988 年までは、栈橋の上から飽和甘汞電極または海水銀/塩化銀電極 (以下、Ag/AgCl-EL) を吊り下げ、深度 ±0 ~ -6.0 m の間を 1.0m 間隔で電位を測定した。1988 年以降の試験では、上段・中段・下段の 3 ヲ所に亜鉛照合電極を設置して、電位を連続的に測定した。なお、亜鉛照合電極の固有の電位 (自然電位) は、飽和甘汞電極または海水銀/塩化銀電極を用いて随時チェックした。本資料では、測定した電位を全て海水銀/塩化銀電極の値に換算して表示した。

b) 干満帯への防食効果

一般の港湾区域内では、M. L. W. L. (平均干潮面) 以下に電気防食が適用される。しかし波浪が大きい環境では、海水は M. L. W. L. (平均干潮面) 以上にも達し、この部分にも電気防食の効果が及ぶと考えられる。すなわち干満帯およびそれより上部にも、電気防食の効果が及ぶ可能性がある。しかしこれに関して定量的に評価した研究は見当たらない。本試験では、海水中に設置した流電陽極の電流による防食

効果が、干満帯およびその上部のどの程度の範囲にまで及ぶかを調べた。

図-2.3 に示すように鋼管杭 No. 23, 30 にはアルミニウム合金陽極 (以下、陽極) が取り付けられている。海底面付近の鋼管杭は、前述したように鋼製の磨耗カバーで保護されており、陽極は磨耗カバーに溶接されている。鋼管杭、磨耗カバーおよび陽極は電氣的に接続されているので、磨耗カバーで保護されていない部分も電気防食の対象となる。なお、陽極の初期発生電流は 3.0 A である。干満帯から上部は被覆防食が施されていないため無防食であり、現在、その部分の鋼管杭は茶褐色の錆層で覆われている。

電気防食の効果は、鋼管杭の現有肉厚を超音波厚み計を用いて測定して、肉厚の減量から判定することとし、鋼管杭 No. 23, 30 について、干満帯および飛沫帯における鋼管杭の現有肉厚の測定を 2004 年 7 月に実施した。暴露されていた期間は 21 年間である。以下に肉厚の測定方法を述べる。

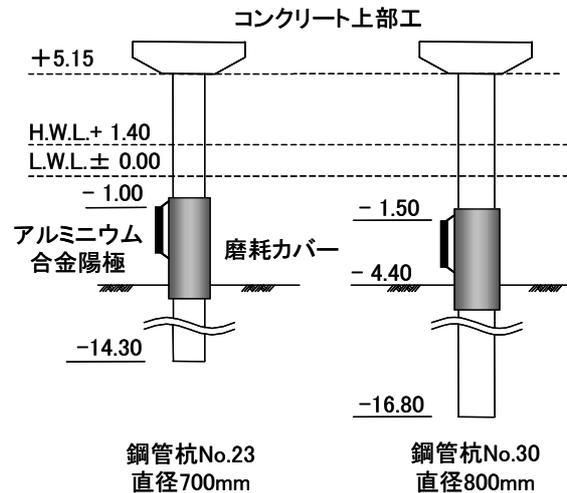


図-2.3 流電陽極の取付け状況

表-2.7 試験期間と測定方法

試験期間	測定方法 (測定機器)	測定頻度	電位測定位置 (水深)	
			No. 22, 26	No. 23, 30
1984 年 ~ 1988 年	電位差計および チャート読み取り式 記録計	年間 5~6 回	±0m ~ -6.0m	±0m ~ -5.0m
			海底面下 -0.5m, -2.0m	海底面下 -0.5m, -2.0m
1988 年 ~ 1993 年	打点式記録計 (アナログ式)	連続測定 (毎時)	上段 : -1.0m	上段 : -1.0m
1993 年~	データロガー (デジタル式)		中段 : -2.0m	中段 : -2.5m
			下段 : -3.0m	下段 : -3.5m

まず測定位置の鋼材表面に付着している海生生物や茶褐色の錆層を、電動工具、またはエア工具を用いてケレンを行い、鋼材の地肌を露出させた。肉厚測定は深度方向の範囲は、+5.0 m から磨耗カバーの上端-0.6 m までとし、測定間隔は0.2 m である。また断面方向の測定位置は図-2.4 に示すように、各鋼管杭によって異なる。鋼管杭No. 23 では北東側と南西側、No. 30 では東北東側と西南西側である。超音波厚さ計の探触子を当てた点を図-2.5 に示す。一辺が約10 cm の正方形の中心を測定位置に置き、その四隅を含めた5カ所に探触子を押し当て、鋼管杭の肉厚を測定した。それぞれの箇所でも3回測定したので、1カ所の測定位置において、 $5 \times 3 = 15$ 点の測定値が得られる。これらの平均値をその位置での現有肉厚とした。なお測定前に校正用試験片を用いて、超音波厚み計を校正している。

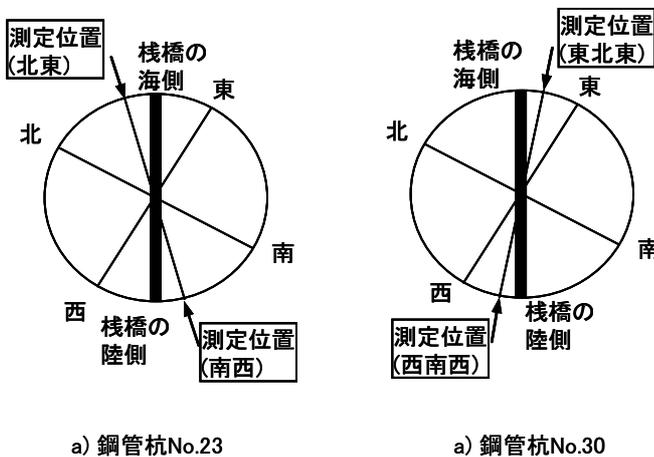


図-2.4 肉厚測定位置の方向

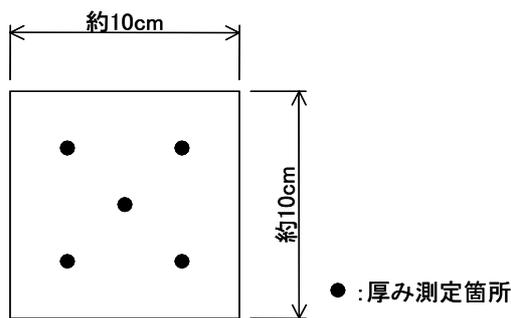


図-2.5 厚み計の探触子を当てた箇所

c) 定電位法による電気防食試験

電気防食の適用にあたり考慮すべき点の一つは、適正な電位を保持しながら防食電流密度を低減させることである。これが実現されれば陽極の寿命が長くなる。防食電位は -780mV (vs. Ag/AgCl-EL) であり、これより卑値であれば防食状態を維持できる。しかし、鋼管杭の電位をどの程度

まで卑値にすれば、防食電流密度が低減し、陽極の寿命が長くなるか明らかになっていない。そこで、適正な鋼管杭の電位と防食電流密度を確認するための定電位試験を実施した。

試験装置を図-2.6 に示す。試験装置は陰極となる鋼材、照合電極および陽極(電極)から構成されている。陽極には不溶性電極(鉛銀電極)を用い、陰極には有効面積 0.1 m^2 のパイプ状のSS400 鋼を使用した。測定に用いた照合電極は、海水銀/塩化銀電極あるいは垂鉛基準電極である。この試験装置を鋼管杭No. 23 の深度 -1.5 m の位置に取付けた。電位の設定にはポテンショスタットを用い、設定電位を -800mV 、 -850mV 、 -900mV (vs. Ag/AgCl-EL) として、各設定電位における防食電流を測定した。

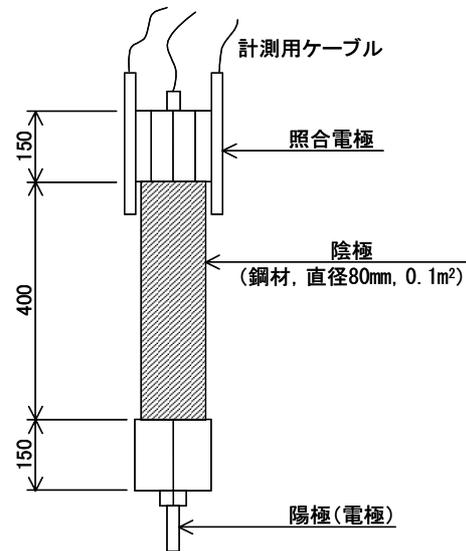


図-2.6 定電位試験装置の模式図

d) サンドエロージョンに対する防食効果

波浪海域における鋼構造物の大きな腐食要因のひとつに、海底の流砂による磨耗作用がある。これは、海底面付近の砂によって鋼材表面の錆が除去されて腐食が促進される現象で、サンドエロージョンと呼ばれている。なおここでいうサンドエロージョンとは、エロージョン・コロージョンの意味を含んでいる。

サンドエロージョンに対する電気防食の効果を確認するために、試験片による試験と実構造物の一部である鋼製の磨耗カバーを切り取り、その厚さを測定する2つの試験を実施した。

d-1) 試験片による試験

図-2.7 に試験に使用した試験片の形状と取付状況を示す。試験片は、直径 20mm、長さ 50mm の円柱である。防食率を算出するために、通電するものと不通電の 2 種類を取付けた。通電試験片は止めネジで取付ハンドルと導通し、等辺山形鋼に溶接された受け金具に固定した。不通電試験片は、取付ハンドルとの間にビニル系チューブを挿入して絶縁し、受け金具に固定した。また両者を比較する目的でサンドエロージョンの影響を受けないように不通電試験片に鞘管を取り付けたものを鞘管付試験片とした。図-2.7 に示すように試験片は等辺山形鋼の左右に取付けた。データの整理上、向かって右側を R 側、左側を L 側と表記する。

次に試験片の設置位置を図-2.8 に示す。試験片は 1993 年 7 月に鋼管杭 No. 22 と鋼管杭 No. 26 の 2 水深（-1.0m と -3.0m）、3 方向（北西側、南西側、南東側）の位置に等辺山形鋼を水中溶接して取り付けた。なお鋼管杭 No. 22 と No. 26 は電気防食が適用されているため、電氣的に接続されている通電試験片には、流電陽極からの防食電流が流れて防食状態となる。

1 年後、8 年後、9 年後の 3 回に分けて試験片を回収し、試験片の腐食減少量から腐食速度と防食率を求め、防食効果を検討した。

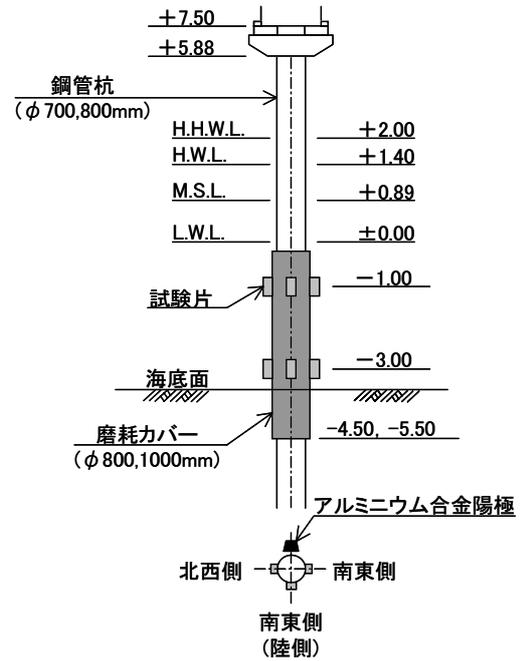
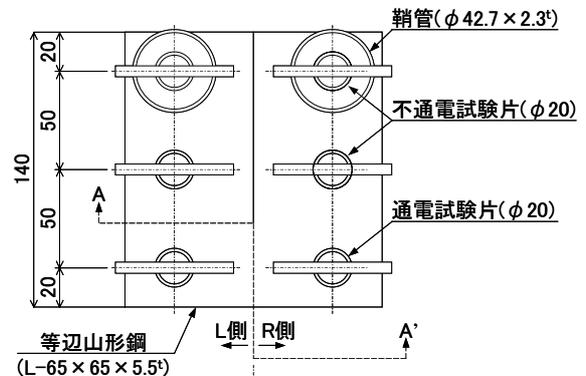
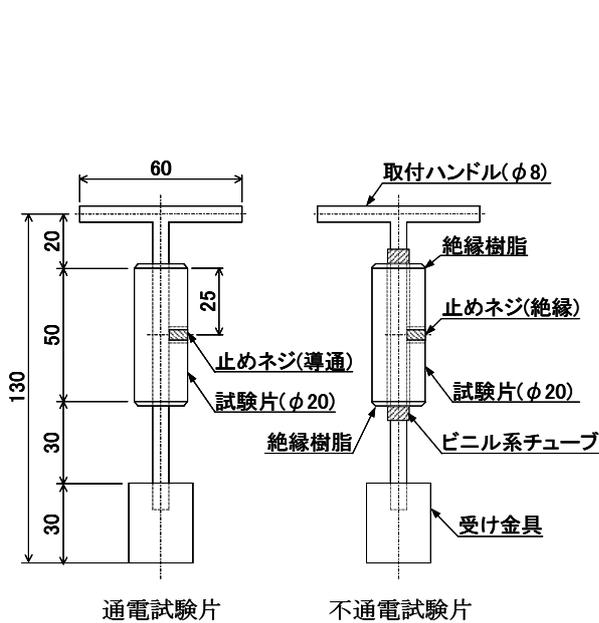
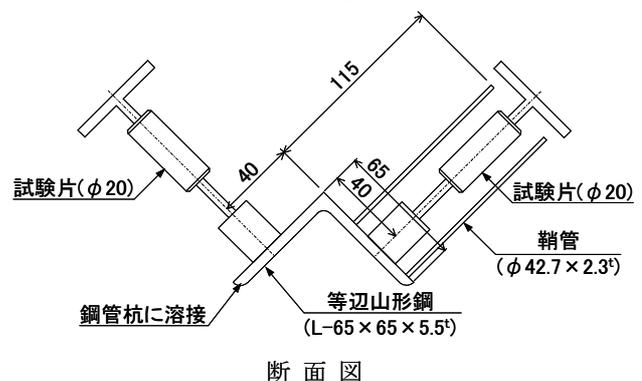


図-2.8 試験片の設置位置



配置図 [1セット]



断面図

図-2.7 試験片の模式図

d-2) 磨耗カバーの切取りによる試験

電気防食を適用している鋼管杭 No. 22 と無防食の鋼管杭 No. 17 に対して、磨耗カバーの一部を切取り、鋼材の厚み測定を実施した。表-2.8 に暴露期間を示す。肉厚測定は、1996年7月と2004年6月の2回行った。

図-2.9 に磨耗カバーの切取位置を示す。また表-2.9 に切取った水深を示す。磨耗カバーは2水深、3方向（北西、南西、南東側）から水中切断した。当初の予定では、水深-1.0mと-3.0mの2深度から切り取る予定であったが、水深が浅く切取り予定の磨耗カバーが一部埋没している箇所があった。また2004年には鋼管杭 No. 17 の磨耗カバーの一部が腐食によりすでに消失していたため、切取位置を若干変更した部分もある。なお切取箇所は300×300×6mmの鋼板を用い、水中溶接によって補修した。

切り取った磨耗カバーの厚みをマイクロメーターで測

定した。測定位置は図-2.10 に示したように、縦横 20mm 間隔で引いた線の交点とした。

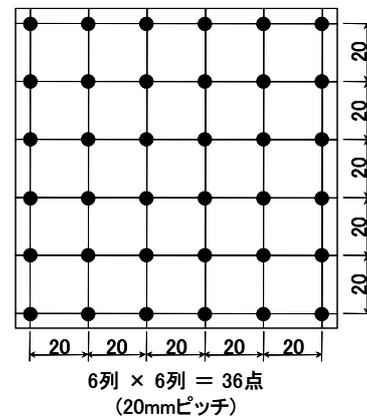


図-2.10 測定点の位置

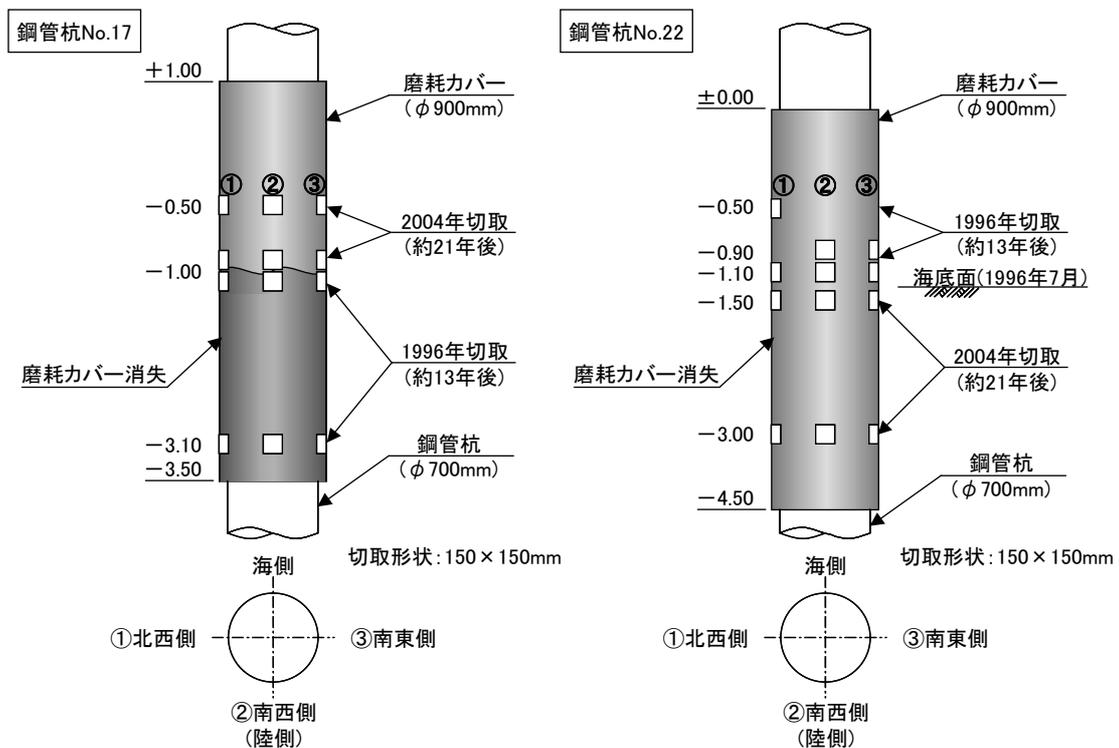


図-2.9 磨耗カバーの切取位置

表-2.8 磨耗カバーの切取試験の暴露期間

	1 回目		2 回目	
試験年月	1996年7月		2004年6月	
暴露期間	13年		21年	
鋼管杭	No. 17	No. 22	No. 17	No. 22
無防食期間	13年	1年	17年	1年
電気防食期間	0年	12年	4年	20年

表-2.9 磨耗カバー切取位置の深度および数

	鋼管杭	深度	切取数
1 回目	No. 17	-1.0m -3.1m	6カ所
	No. 22	-0.5m, -0.9m -1.1m	6カ所
2 回目	No. 17	-0.5m -1.0m	6カ所
	No. 22	-1.5m -3.0m	6カ所

(2)被覆防食工法

被覆防食工法における検討課題を図-2.11に示す。防食効果を確認するために、1年に1回の間隔で定期的に外観を観察し、さらに約20年経過時において被覆材を剥離して、鋼材表面の素地を観察した。また被覆材の耐久性を検討するために、絶縁抵抗、付着力、塩化物イオンの浸透深さ、機械的性質、減耗量などを測定した。

被覆防食工法の種類は多岐にわたるので、a)塗装・有機ライニング工法、b)無機ライニング工法、c)ペトロラタムライニング工法に分類し、それぞれの試験実施概要を以下に述べる。

a) 塗装・有機ライニング工法

本資料で取り上げる防食工法は、超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法、ポリエチレンライニング工法、水中硬化型ライニング工法、極厚マスチック防食工法の4工法である。各工法の試験項目を表-2.10に示す。以下に、それぞれの項目について概要を記述する。

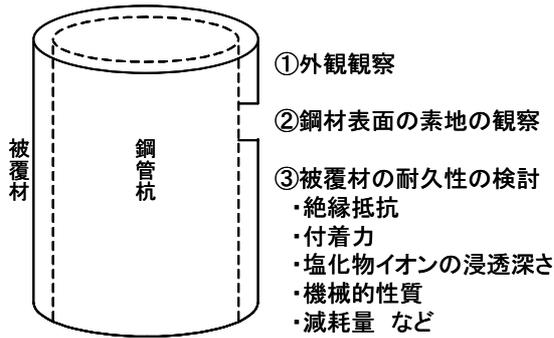


図-2.11 被覆防食工法の検討課題

a-1) 外観観察

防食効果を確認するため、外観観察を実施した。この際、海生物が附着している部分は、海側および陸側の各1カ所について上端から下方に向かい、軸方向長さ30cm×円周方向幅40cm程度の範囲を、海生物を除去して観察した。

a-2) 絶縁抵抗測定

測定箇所は図-2.12に示すように、陸側面の+3.5mと+5.0mの2カ所である。測定器の結線を図-2.13に、測定端子の概要を図-2.14に示す。また測定状況を写真-2.1に示す。測定面に付着物がある場合はまずそれを除去し、次に導電性ゴム製の電極(50×50mm)を測定面(25cm²)にあて、その上に合成樹脂製の薄い板を絶縁板として、締付器具等で締付けて固定した。電極の端子および鋼材の端子に絶縁

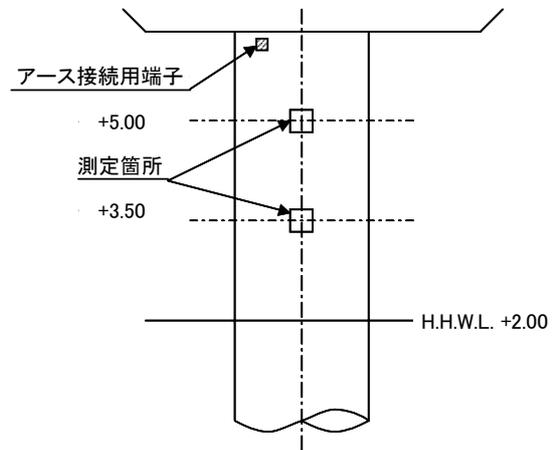


図-2.12 絶縁抵抗の測定箇所

表-2.10 塗装・有機ライニング工法の試験項目

	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	ポリエチレンライニング工法	水中硬化型ライニング工法	極厚マスチック防食工法
試験対象の鋼管杭 No.	K2, K3	31~35	18	27, 28
外観観察	○	○	○	○
絶縁抵抗測定	○	○	○	○
付着力試験(アドヒージョンテスト)	○		○	○
付着力試験(ピール強度)		○		
塩化物イオンの浸透深さ測定	○		○	
鋼材表面の素地の観察	○	○	○	○
塗膜厚み測定		○		
鋼管杭の肉厚測定		○		
ライニング材の分析(機械的性質)		○		
ライニング材の分析(体積固有抵抗)		○		
ライニング材の分析(吸水率)		○		

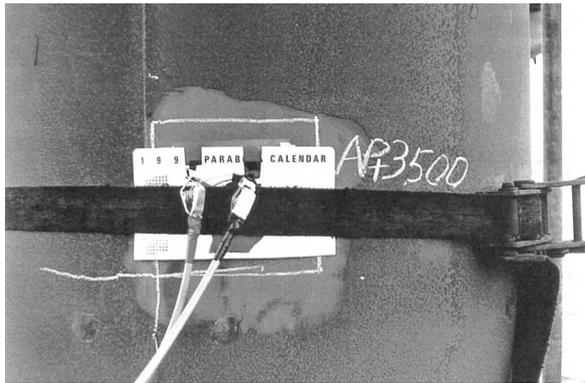


写真-2.1 絶縁抵抗の測定状況 (写真-B.3 参照)

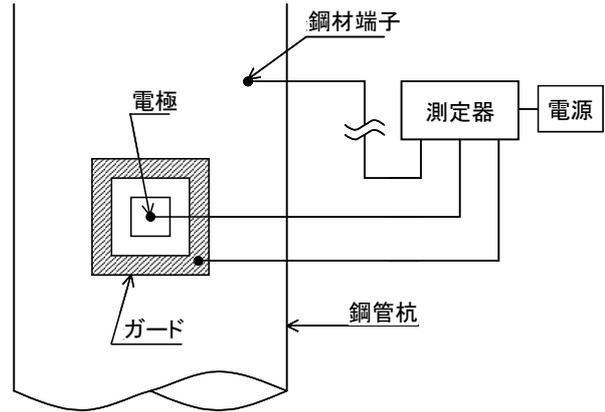


図-2.13 絶縁抵抗測定機器結線図

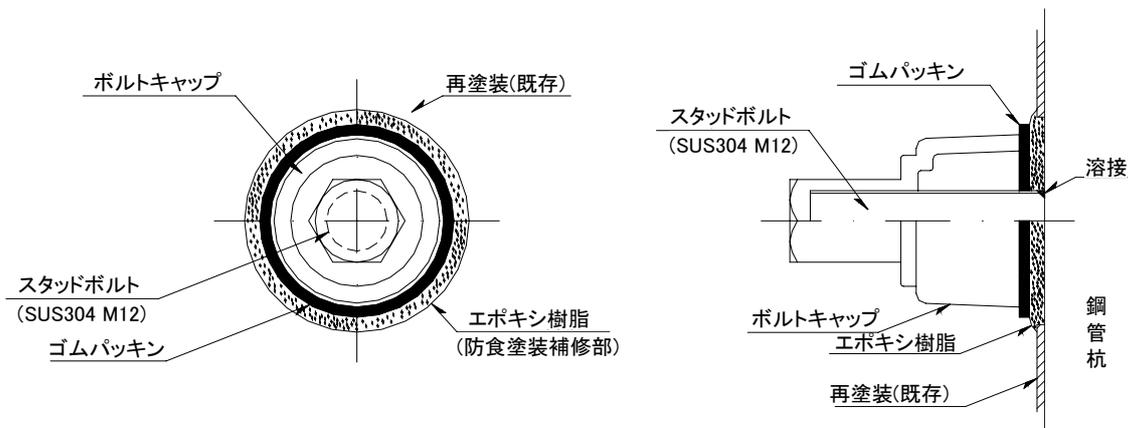


図-2.14 絶縁抵抗測定用端子の概要図

抵抗計からのリード線を接続した後に絶縁抵抗を測定した。

なおポリエチレンライニング工法に関しては、被覆層の絶縁抵抗値が高く、漏洩電流の影響が大きいので、15年目の測定以降は、測定部分全体をカバーで覆い、カバー内に窒素を充填する方法により、漏洩電流を小さくして絶縁抵抗の測定を行った。

a-3) 付着力試験

付着力試験の方法は、被覆材の種類によって異なり、アドヒージョンテスターによる方法とピール強度試験がある。いずれの場合も測定位置はコンクリート上部工より 2m 下の位置までの範囲である。その範囲内の 2 ヶ所以上で測定した。

アドヒージョンテスターによる測定方法は、付着力を測定する被覆材の表面をサンドペーパーで研磨した後、粉塵等を拭き取り清浄し、その上に接着剤を用いてドリリーを貼り付け、硬化するまで所定の時間を保持した。その後ドリリー周辺の塗膜をホルソーを用いて鋼材表面の素地まで切り取り、アドヒージョンテスター (106 Adhesion Tester, エルコメーター社製) を用いてドリリーを引張り、塗膜が鋼材面か

ら剥がれた時の値を強度として読み取り記録した。

ピール強度試験の測定要領を図-2.15 に示す。測定箇所にカッターナイフで幅 10mm の切り込みを入れ、測定用クランプが掛けられる長さ (20mm) まで剥がす。切り込み部にクランプを取り付け、ばね秤を用いて約 50mm/min の速度で 90° 方向に引張り、ばね秤が示す目盛の最大値を読み取った。

a-4) 塩化物イオンの浸透深さ測定

塗膜中への塩化物イオンの浸透深さを測定するため、まず、塗膜を鋼材表面の素地から強制的に剥離した。剥離した位置は、杭上部より 2m 下の海側、陸側の 2 ヶ所で、剥離面積は 5×5 cm である。その塗膜を図-2.16 のようにガラス板で挟み、エポキシ樹脂 (エポキシ系接着剤) で下端を固定して試験体を製作した。同図に示す試験体の塗膜側の断面をサンドペーパー (#240) で粗磨きし、順次細かい目のサンドペーパーで研磨し、最終的に #1500 で仕上げ磨きを行った後、アルミナ粉でバフ研磨を行った。

その後試験体を EPMA (電子線プローブマイクロアナライザー; JEOL T330A SEM, JED2420EDS 分析装置, 日本電子製)

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、海面側より深さ方向に 300 μm 、幅 200 μm とした。なお、1 ピクセルは 1 \times 1 μm である。積算ピークより塩素イオンの浸透度 (単位: μm) を評価した。

a-5) 鋼材表面の素地の観察

測定位置は、コンクリート上部工から 2m 下であり、方向は海側、陸側の 2 方向である。20 \times 20cm の範囲で鋼材表面の素地に達するまでナイフ等で切り込みを入れて、スクレパー等で被覆材を剥ぎ取り、鋼材表面の発錆の有無、錆の面積、孔食の有無を観察した。

a-6) 塗膜厚み測定

塗膜の厚み測定要領を図-2.17 に示す。校正用の標準板に測定探触子を当て、電磁膜厚計 (サンヨー電子研究所 SL-120C) の校正を行ってから、測定面に異物などがある場合は除去し、測定位置に電磁膜厚計の探触子を当て、同一位置で 3 回測定を行った。

a-7) 鋼管杭の肉厚測定

鋼管杭の肉厚測定の要領を図-2.18 に示す。測定した位置は深度+2.77m の北西側で、範囲は 200 \times 300mm 程度とし、ディスクサンダーにて鋼材表面を傷つけないように被覆材を切断して、片方よりノミ、タガネを用いて被覆材を鋼材面より剥がした。被覆材を剥がした 100 \times 100mm 範囲内の 5 点で、超音波厚み計を用いて鋼管杭の現有肉厚を測定した。

a-8) ライニング材の分析

・サンプルの採取

a-7) で採取したポリエチレンライニングの詳細試験を実施した。対象は鋼管杭 No. 31~35 である。鋼材表面とポリエチレンライニングとの密着が強固なため、鋼材とポリエチレンの間にノミやタガネをハンマーで叩き込みながら引き剥がしたところ、サンプル全面にひび割れが発生した。

・採取サンプルの測定前処理

採取したポリエチレンライニングは、全面にひび割れが生じた状態であったので、剥がした綿側より研磨加工を少しずつ行い、ノッチ傷状態を観察した。その結果、鋼管杭 No. 34, 35 から採取したポリエチレンライニングはノッチ傷が表面近傍に達しており、試験体として不適な状態であった。鋼管杭 No.33 から採取したポリエチレンライニングは、ノッチ傷が比較的少なく研磨加工でノッチ傷が概ね除去できたと判断し、試験体とした。鋼管杭 No.31, 32 から採取したポリエチレンライニングは、更に細かいノッチ傷をアイロンを使用して加熱・再熔融し、傷の除去を行ったうえで測定に

供した。ただし本処置後もノッチ傷の完全除去には至らなかった。

・引張試験の方法

鋼管杭 No.31~33 から採取したポリエチレンライニングを JIS K 7113 (プラスチックの引張試験方法) に準拠して引張試験を行った。試験片は、JIS K 7113 に記載されている 2 号試験片とした。引張試験を行った温度は 23 $^{\circ}\text{C}$ 、引張速度は 50mm/min である。試験から得られた S-S カーブより、引張降伏強さ、引張破断強さ、引張破断伸びを求めた。

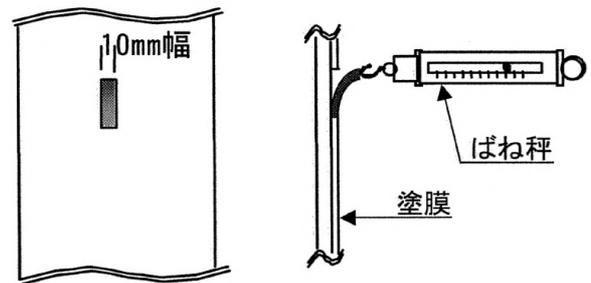


図-2.15 ピール強度測定要領図

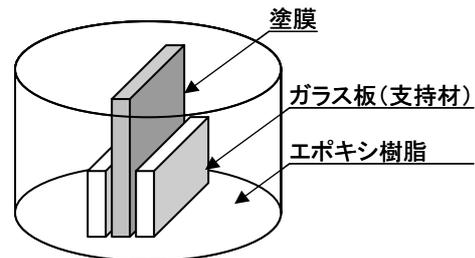


図-2.16 塩化物イオンの浸透深さ測定用試験体

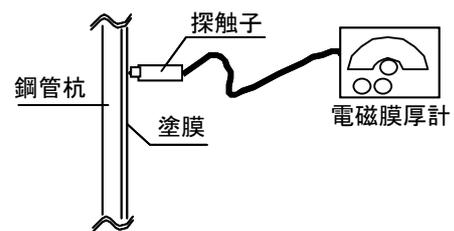


図-2.17 塗膜厚み測定要領図

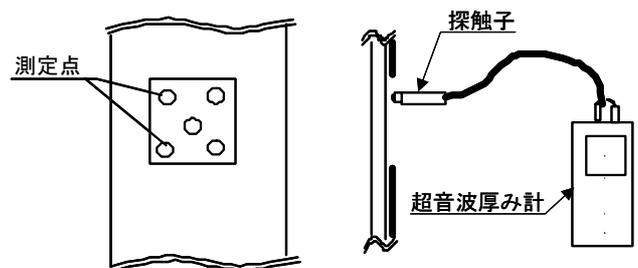


図-2.18 鋼管杭の肉厚測定要領図

・体積固有抵抗の測定方法

鋼管杭No.31~33 から採取したポリエチレンライニングを 10×10cm に切り出し、体積固有抵抗測定装置（横河ヒューレットパッカード社製 4329A High Resistance Meter）を用いて測定した。

・吸水率の測定方法

鋼管杭No.31~33 から採取したポリエチレンライニングを 10×10cm に切り出し、その試験材を 23℃の蒸留水に 1 日浸漬して、前後の質量変化から吸水率を算出した。なお測定は JIS K 7209（プラスチック-吸水率の求め方）に準拠した。

b)無機ライニング工法

本資料で取り上げる防食工法は、電着工法、CRUS 工法の 2 工法である。各工法の試験項目を表-2.11 に示す。以下、それぞれの項目について、その試験の概要を記述する。

表-2.11 無機ライニング工法の試験項目

	電着工法	CRUS 工法
試験対象の鋼管杭 No.	9, 10, 11	29
外観観察	○	○
付着力試験	○	
被覆材の厚み測定	○	
被覆材の成分分析	○	
被覆材の細孔構造分析	○	
鋼材表面の素地の観察	○	○
鋼管杭の肉厚測定	○	
圧縮強度、静弾性係数試験		○
塩化物イオンの浸透深さ試験		○
コンクリートの中酸化試験		○

b-1) 外観観察

本項 a-1) と同様の方法で観察した。

b-2) 電着皮膜の付着力試験（電着工法）

電着皮膜の付着力は一般にアドヒージョンテスターにより定量的に行われるが、砕波帯の海水中で行うことは困難なため、次の方法で定性的に行った。鋼管杭 No. 11 における H. W. L. 付近の 20×20cm の範囲の電着物をスクレーパーおよびハンマーを用いて強制剥離した。そのときの剥離する力や剥離の様子から、付着力の大きさを判断した。

b-3) 電着皮膜の厚み測定（電着工法）

鋼管杭 No. 11 において、H. W. L. 付近から L. W. L. 付近にか

けて採取した、約 3~7cm の大きさの小片の電着物の中からそれぞれの部位ごとに代表的なものを 5~10 片取り出し、小片ごとに縁辺部の 3 測点をノギスで測定した。3 つの測定点の平均値を小片の平均厚さとし、採取した 5~10 片の試料でそれぞれの部位における電着皮膜厚さの最大~最小の範囲を求めた。

b-4) 電着物の成分分析および細孔構造分析（電着工法）

電着物の主成分である CaCO₃ および Mg(OH)₂ の定量分析には、採取した電着物を 110℃で 2 時間乾燥し、乾燥ベース質量を測定して分析に供した。分析は JIS K 1051(工業塩試料採取方法及び分析方法)に準拠し、試料を 900℃で 2 時間燃焼して、水分および有機物を除去（強制加熱減量; Ig. loss%）した燃焼残渣をベースとして CaO および MgO の定量値を求め、分子量換算して乾燥質量(100%)に対する CaCO₃ および Mg(OH)₂ の質量%を求めた。なお、採取した電着物には海水中の砂等が存在するために、CaCO₃ および Mg(OH)₂ の合計は 100%にはならない。

また、細孔構造の分析は、水銀圧入法によって行った。剥離した電着皮膜を破碎し、その中から 2.5~5mm 程度のものを採取して、それを 40℃で 2 日間乾燥させたものを試料として用いた。測定には水銀圧入式ポロシメータを用いた。測定の原理図を図-2.19 に示す。

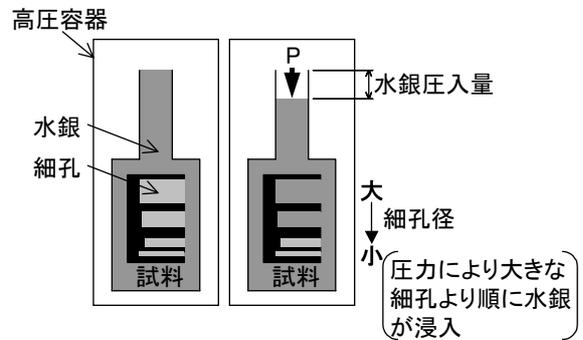


図-2.19 水銀圧入式ポロシメータの測定原理図

本装置は、真空状態から最大 2,000kgf/cm² までの圧力がかけられ、細孔半径で 0.75mm から 37.5Å までの細孔の測定が可能である。注入圧力と水銀が圧入される細孔半径との間には (2.1) 式の関係式が成立し、本式より各細孔半径に対応する空隙量（細孔径分布）および総空隙量を求めた。

$$r = 75000 / P \quad (2.1)$$

ここで r は細孔半径 (Å), P は加えられた絶対圧 (kgf/cm²) である。

b-5) 鋼材表面の素地の観察 (電着工法)

測定レベルは+1.40~±0.00m であり、方向は陸側である。20×20cm の範囲で、鋼材表面素地に達するまでナイフで切り込みを入れて、スクレパーで電着物を剥ぎ取った。鋼材表面での発錆の有無、錆の面積、孔食の有無を観察した。

b-6) 鋼管杭の肉厚測定 (電着工法)

鋼管杭 No. 11 の +1.40~-0.20m の範囲の表面をワイヤブラシで ISO-St2 程度に素地調整し、超音波厚み計を用いて肉厚を測定した。

b-7) 物性試験 (圧縮強度および静弾性係数) (CRUS 工法)

コアサンプルの採取は、当初計画ではコンクリート天端より 1m 程度下がった位置で行なう予定とし、最干潮時に作業を実施したが、波浪が激しくボーリングマシンを固定することができなかつたため、上端部に近い位置(材令 6 年, +1.1m)に変更した。また、コンクリート天端より 0.6m 下がった位置(材令 21 年, +0.7m)からも採取した。

コアサンプルは、各水深で海側、陸側の 2 方向について各 2 本ずつ採取し、本項の物性試験に各 1 本、b-8)、b-9) 項の試験に各 1 本を使用した。コアサンプルの寸法は直径 5cm、長さ 15cm である。

なお、コンクリートの圧縮強度試験および静弾性係数試験は、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) および JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) に準拠して行なった。

b-8) 塩化物イオンの浸透試験 (CRUS 工法)

+1.1m 地点(材令 6 年)と、+0.7m 地点(材令 21 年)に浸透している塩化物イオン量を測定した。

コアサンプルの寸法は、前述のように直径 5cm、長さ 15cm である。これを 1cm ごとにスライスした試料を微粉末にした後、JCI 基準(JCI-SC4)に準拠して浸透試験を行った⁴⁾。

b-9) コンクリートの中性化試験 (CRUS 工法)

b-7) のようにコアサンプルを採取した後の孔内と採取したコアを、乾燥させた後にフェノールフタレイン-アルコール溶液を噴霧し、表面の着色状況を観察した。

c) ペトラタムライニング工法

本資料で取り上げる防食工法は、チタンカバー工法、ポリエチレン樹脂カバー工法、FRP 樹脂カバー工法の 3 工法である。各工法の試験項目を表-2.12 に示す。以下に、それぞれの項目について、試験の概要を述べる。

c-1) 外観観察

a-1) と同様である。

c-2) チタンカバー溶接部の観察(チタンカバー工法)

チタンカバー端部は厚さ 0.7mm のチタン板と 50×5mm のチタン製平鋼を隅肉溶接にて一体化している。溶接部の外観および断面を顕微鏡を用いて観察した。

表-2.12 ペトラタムライニング工法の試験項目

	チタンカバー工法	ポリエチレン樹脂 カバー工法	FRP 樹脂カバー工法
試験対象の鋼管杭 No.	6	14	22
外観観察	○	○	○
チタンカバー溶接部の観察	○		
チタンカバー表面変色の分析	○		
チタンカバーの引張試験	○		
ペトラタム防食層の観察		○	○
鋼材表面の観察		○	○
樹脂系カバー材の引張強度試験		○	○
樹脂系カバー材の曲げ強度試験		○	○
ペトラタム防食層の油分残存率測定		○	○
試験片による防食効果の確認			○
鋼管杭の肉厚測定		○	

c-3) チタンカバー表面変色の分析(チタンカバー工法)

チタンカバー表面が茶色および虹色に変色しているため、変色に関わる成分を調べるために茶色と虹色部の各一点の表面を EPMA (電子線プローブマイクロアナライザー; JXA8600A 日本電子製) によって元素分析を行った。

c-4) チタンカバーの引張試験(チタンカバー工法)

チタンカバーの機械的性質を評価するために、チタンカバーから試験片を採取し、引張試験を行った。引張試験片 (JIS Z 2201 金属材料引張試験片による 5 号試験片) は、チタン板製造の圧延方向 (L 方向) と圧延直角方向 (C 方向) から各 3 本切り出した。なお、引張試験は (JIS Z 2241 金属材料引張試験方法) に準拠して行った。

c-5) ペโตรラタム防食層および鋼材表面の素地の観察

カバー材を取り除き、ペโตรラタム防食層の状態を観察するとともに、ペโตรラタム防食層を除去して、鋼材表面を観察した。

c-6) ポリエチレンおよび FRP カバーの強度試験 (ポリエチレン樹脂カバー工法, FRP 樹脂カバー工法)

保護カバー材の強度を測定するため、海上大気中、干満帯、海水中の 3 ヶ所からカバー材の一部を切出し、ポリエチレンカバーについては JIS K 7113 (プラスチックの引張試験方法) に、FRP カバーについては、JIS K 7054 (ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法) に準拠して測定を行った。

c-7) ペโตรラタム層の油分残存率試験 (ポリエチレン樹脂カバー工法, FRP 樹脂カバー工法)

油分の残存率については基準化された方法がないため、防食・補修工法研究会が提案している下記の方法にしたがった⁵⁾。

$$\text{油分の残存率} = \frac{\text{単位面積当たりに換算した回収防食材の乾燥質量}}{\text{単位面積当たりの新品防食材の規格質量}} \times 100 \quad (2.2)$$

c-8) 試験片による防食効果の確認

防食効果を定量的に把握する目的で、あらかじめ質量既知の短冊状の試験片 (50×15×0.3 mm) を被覆防食層内の +4.26m と +2.76m の位置に挿入しておき、約 18 年後に試験片を取り出し、質量減少量から防食率を算出した。また +4.26m, +2.0m, +0.5m の位置で、超音波厚み計により鋼管杭の肉厚を測定した。

(3) 飛来海塩粒子の測定

飛来海塩粒子の測定は、JIS Z 2381 (大気暴露試験方法通則) および JIS Z 2382 (大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定) に規定されている方法に準拠して行った。測定ボックスは +6.00m の高さの栈橋上に 6 ヶ所設置した。設置した位置を図-2.20 に、設置状況の一例を写真-2.2 に示す。約 1 ヶ月に 1 回の頻度で測定ボックス内に放置されているガーゼを回収して、海塩粒子の付着量を測定した。

また港湾区域内における飛来海塩粒子の付着量と比較するため、港湾空港技術研究所内 (久里浜) の暴露試験場においても同様の測定を実施した。

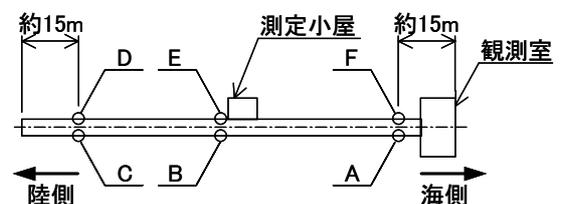


図-2.20 測定ボックスの設置位置

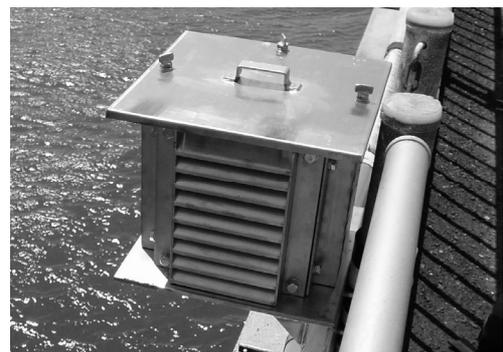


写真-2.2 測定ボックスの設置状況 (写真-B.4 参照)

3. 試験結果および考察

3.1 飛来海塩粒子

久里浜における測定結果を図-3.1に示す。横軸はガーゼを暴露した期間を表し、その期間の飛来海塩粒子の付着量を1日あたりの値に換算して、その値を縦軸に示した。久里浜の暴露試験場における測定結果では、最大でも0.60 mg/d/100cm²(以下、単位をmddと略記する)であり、年間を通じた平均値は0.17 mddであった。

一方、本棧橋におけるA~F地点の測定結果を図-3.2~図-3.7に示す。それぞれの地点の平均値は、A地点0.77 mdd, B地点0.75 mdd, C地点1.13 mdd, D地点2.56 mdd, E地点0.86 mdd, F地点0.76 mddであった。久里浜に比べて、飛来海塩粒子の付着量は全ての測定地点で多かった。測定

地点で比較すると、沖合いに位置するC, D地点は他の地点と比較して、飛来海塩粒子量が多い傾向にあった。

図-3.8に、1991年~1999年間の波高および波向の出現頻度と測定地点の関係を示す。この図から東北東あるいは東からの波の出現頻度が大きいことがわかる。したがって波の影響を最も受けやすいのはD地点といえる。他の地点より波しぶきによる海塩粒子が多く飛来するため、D地点の付着量が最も大きくなったものと考えられる。

全地点の平均値は1.14 mddであった。港湾空港技術研究所内の暴露試験場での平均値が0.17 mddであることから、本棧橋では港湾区域内に比べて海塩粒子量が多いといえる。

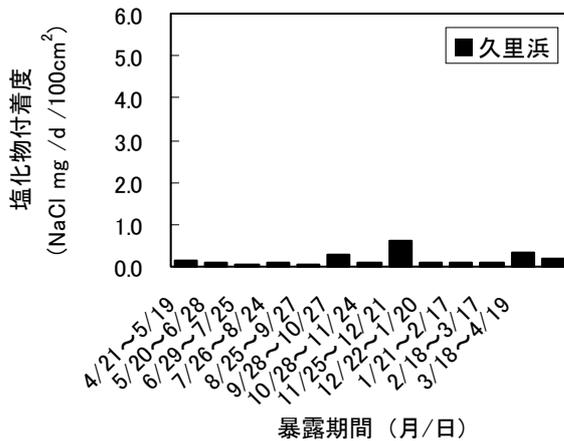


図-3.1 久里浜における塩化物付着度

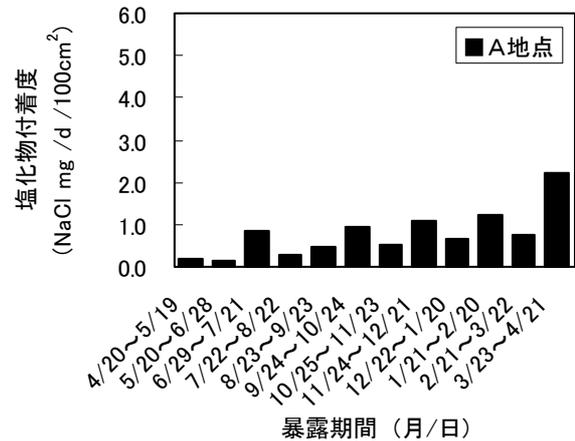


図-3.2 A地点における塩化物付着度

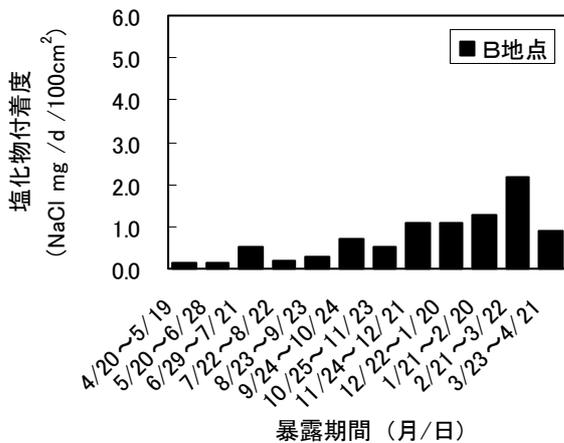


図-3.3 B地点における塩化物付着度

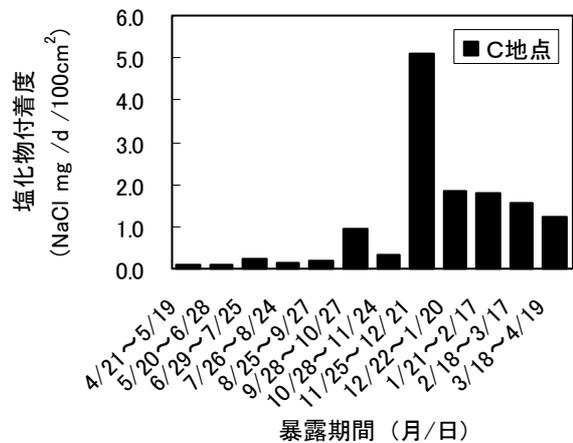


図-3.4 C地点における塩化物付着度

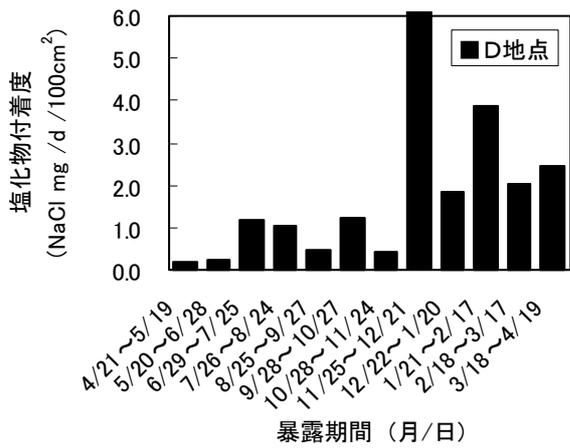


図-3.5 D地点における塩化物物付着度

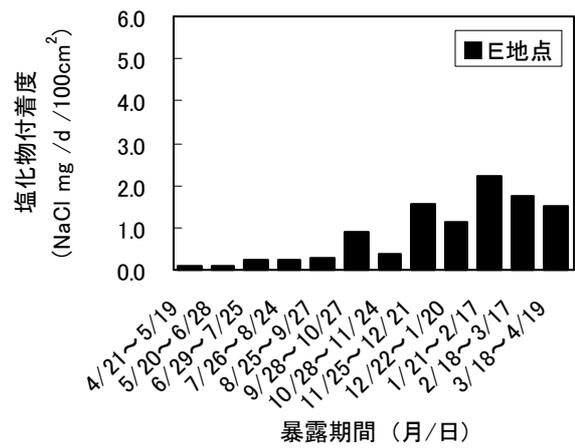


図-3.6 E地点における塩化物物付着度

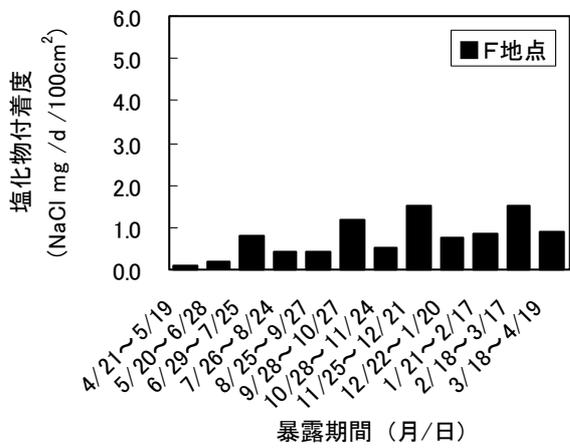


図-3.7 F地点における塩化物物付着度

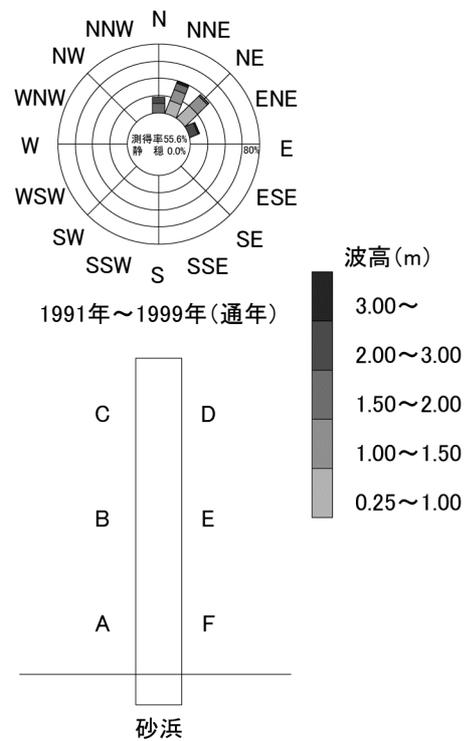


図-3.8 波高，波向の出現頻度と測定位置の関係

3.2 無防食鋼管杭の腐食傾向

建設から約4年間、鋼管杭 No. 3 および No. 16 を無防食状態で暴露していた。これらの鋼管杭の腐食状況を調べるために、肉厚測定を実施した。各杭の測定範囲を表-3.1に示す。なお鋼管杭 No. 16 の+1.0～-3.0m 間は鋼製の磨耗カバーが取り付けられているので、この間は磨耗カバーの肉厚を測定した。その結果を図-3.9、図-3.10に示す。横軸の肉厚減量は、鋼管杭の設計肉厚から、測定時点の現有肉厚を減じた値である。なお、肉厚減量は同じ地点で複数回測定した値の平均値である。

測定方向と腐食速度の関係について述べる。No. 3 および

No. 16 のいずれも、飛沫帯および海上大気中に位置する+2.0m 以上では、陸側よりも海側の方が腐食速度は大きかった。これは海側の方が波のしぶきがかかりやすいからである。また、これより下部では、No. 16 の場合、海側と陸側の腐食速度はあまり変わらない。この環境では海水中に没している時間が長く、波しぶきの影響は小さいので、方向による差があらわれなかったと考えられる。

次に深度と腐食速度の関係を表-3.2に整理した。海上大気中および飛沫帯における腐食速度は0.20～0.40mm/y であり、干満帯および海水中では0.10～0.20mm/y であった。全体的な傾向として、鋼管杭 No. 3 の方が No. 16 に比べて腐

表-3.1 肉厚測定範囲

鋼管杭 No.	測定方向	測定範囲と測定深度
3	海側と陸側	+5.0～+2.0m (1.0m 間隔) +2.0～+0.6m (0.2m 間隔)
16	海側と陸側	+5.0～+2.0m (1.0m 間隔) +2.0～-3.2m (0.2m 間隔)

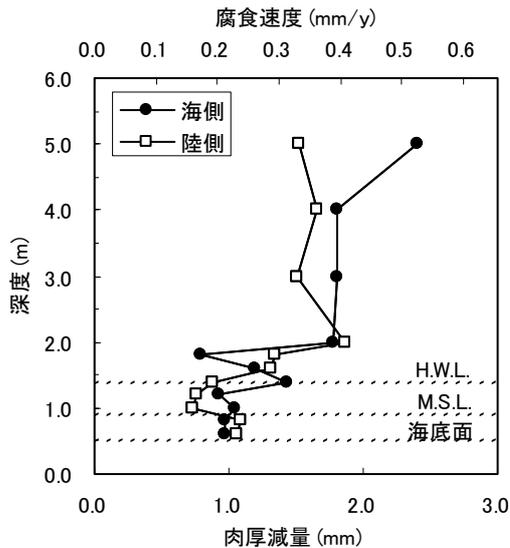


図-3.9 鋼管杭 No. 3 の肉厚減量と腐食速度

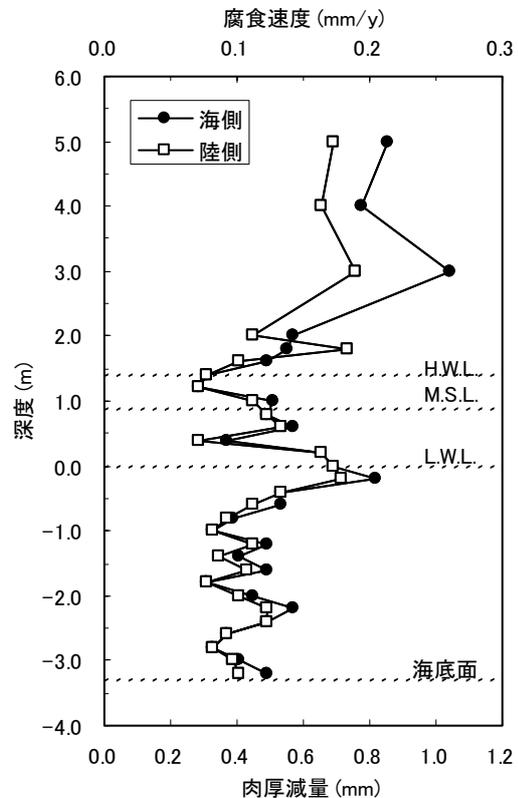


図-3.10 鋼管杭 No. 16 の肉厚減量と腐食速度

表-3.2 深度と腐食速度の関係

深度	鋼管杭 No. 3	鋼管杭 No. 16	
+5.0～+2.0m	海上大気中および飛沫帯	海側+5m では、0.52mm/y に達する。	およそ0.22mm/y 程度である。 +3.0m 付近が最大となる。
+2.0～±0.0m	飛沫帯および干満帯	およそ0.22mm/y 程度である。	0.10～0.15mm/y 程度である。
±0.0m 以下	海底土中 (No. 3) 海水中 (No. 16)	—	0.10mm/y 程度である。 ±0m 直下のみ腐食速度が0.20mm/y となる。

食速度は大きい。これは立地条件の差異によるものと考えられる。鋼管杭 No. 3 の場合、地盤面は約+0.5m 付近にあり、干潮状態になると波しぶきのみならず飛散した砂が直接鋼管杭にあたるため、腐食が促進されることが考えられる。したがって鋼管杭 No. 3 の方がより厳しい環境条件下にあり、全体的に高い腐食速度を示したものと考えられる。

3.3 電気防食工法

ここでは、(1)鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移、(2)干満帯への防食効果、(3)適正な鋼管杭電位の把握(定電位法による試験)、(4)サンドエロージョンに対する防食効果について述べる。

(1) 鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移

電気防食工法を適用した鋼管杭は No. 22, No. 23, No. 26, No. 30 の 4 本である。No. 22 は、ペトロラタム防食工法を併用している。試験では、鋼管杭の電位および陽極からの発生電流を測定した。

a) 電位測定

試験開始から 4 年後までの結果は前報で報告した⁶⁾。これによると通電開始 24 時間程度で鋼管杭の電位は防食電位(-780mV(vs. Ag/AgCl-EL))より卑値になる。本資料では、これ以降の電位測定結果を整理し、図-3.11~図-3.14 に示す。いずれの鋼管杭についても、陽極を設置した直後より電位は速やかに卑値に移行した。陽極交換時および無防食期間を除いて電位は防食電位より卑値の-850~-1100mV に保持されている。それ故、本試験施設は一般の港

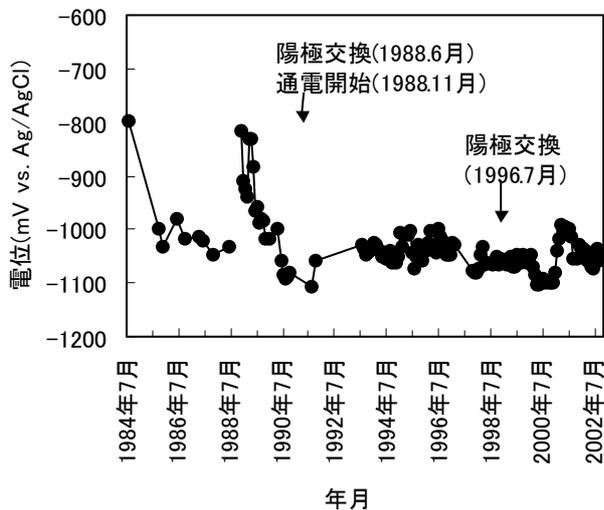


図-3.11 鋼管杭 No. 22 の電位

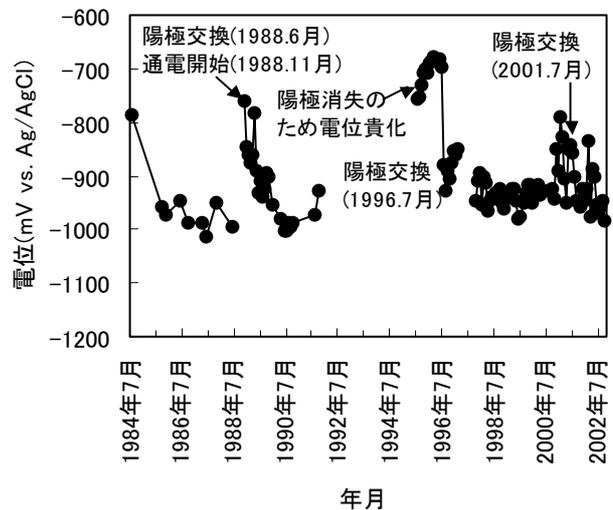


図-3.12 鋼管杭 No. 26 の電位

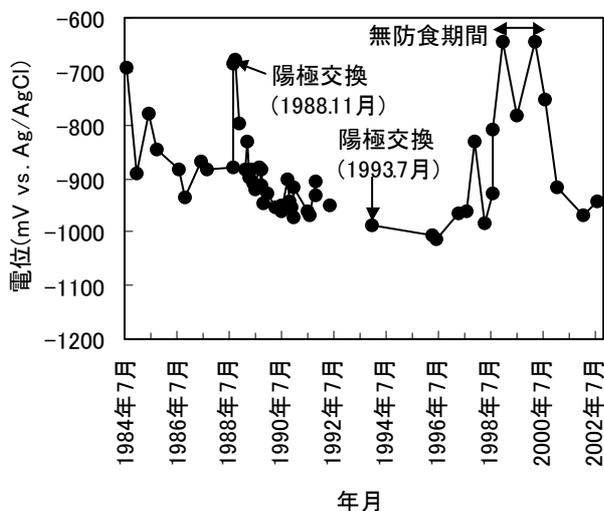


図-3.13 鋼管杭 No. 23 の電位

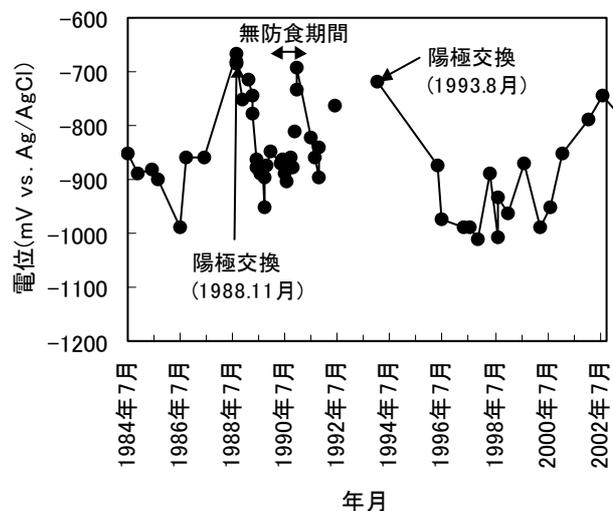


図-3.14 鋼管杭 No. 30 の電位

湾区域とは異なり、①波浪が大きい、②海底面の深さが変動する、③流砂によるサンドエロージョンが生じる、などの環境条件の厳しい環境であっても電気防食は十分に機能していることが確認された。

次に陽極の交換時の電位変化について述べる。いずれの鋼管杭においても陽極が消耗して交換時期になると、電位は貴値に移行した。鋼管杭 No. 30 のように、数カ月の無防食(不通電)期間がある場合は、防食電位よりも貴値な-700mV まで復極する場合もあった。しかし通電開始後は、電位は卑値に移行しはじめて、ほぼ1ヵ月以内に再び防食電位よりも卑値になり安定した防食状態が維持された。

b) 陽極からの発生電流

前報で述べたように⁶⁾、1984年の通電開始直後では3.8～5.7Aの電流が流れていたが、時間の経過とともに電流は減少し、約1年半後には0.6～1.9Aまで低減し、その後は陽極の交換時までほとんど変化しなかった。

次に陽極交換時の発生電流の変化について述べる。鋼管杭 No. 22 と No. 26 については図-3.15 と図-3.16 に、鋼管杭 No. 23 と No. 30 については図-3.17 と図-3.18 に測定結果を示す。いずれの鋼管杭についても、陽極交換時には発生電流が増大する傾向にあるが、速やかに0.5～1.5Aまで低減した。図-3.16 に示すように鋼管杭 No. 26 については1988年6月と2001年7月の陽極交換時点の電流を測定している。1988年の交換時には電流が4Aまで増大したが、2001年の交換時では2A程度までの増加にとどまった。

1988年の陽極交換時の不通電期間は約4ヵ月、2001年で

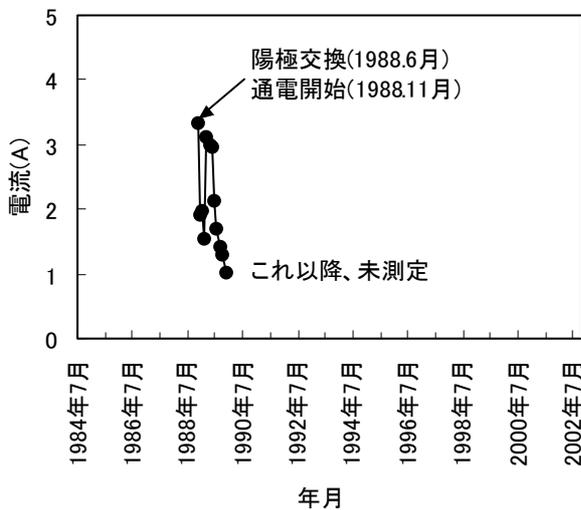


図-3.15 鋼管杭 No. 22 の発生電流

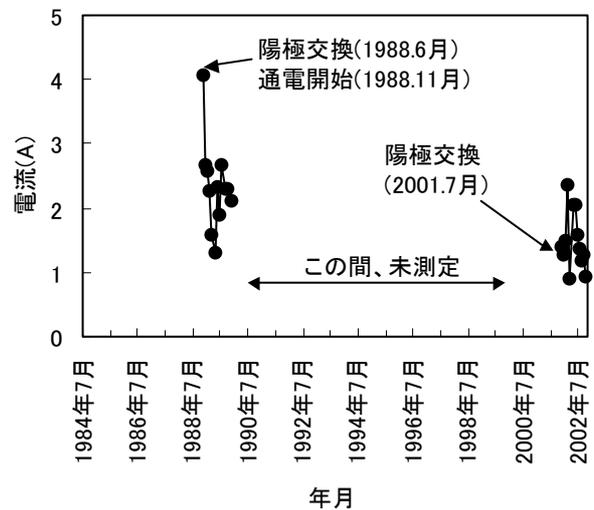
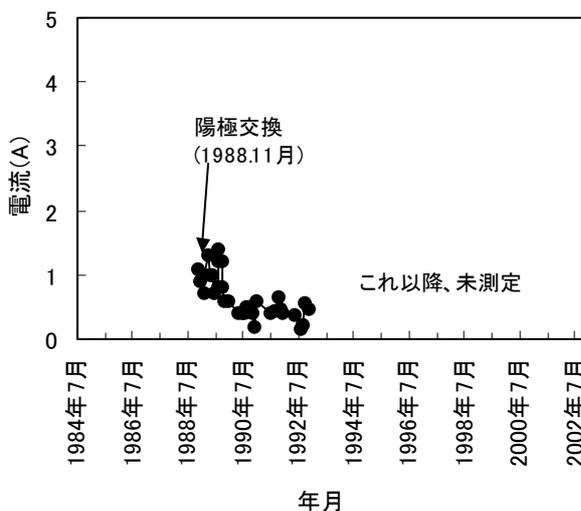


図-3.16 鋼管杭 No. 26 の発生電流



は約1日であり、また海底面深さが変化するために、両交換時における防食対象面積も異なるので、両者の電流変化を単純に比較することはできないが、陽極交換時における発生電流の増加傾向は、通電期間とともに小さくなる傾向にあると考えられる。これは、長時間の通電により鋼管杭の表面には石灰質被膜(エレクトロコーティング)が形成され、被膜の抵抗が増加し、酸素の拡散限界電流が低減し、安定した状態になっていたものと考えられる。

c) まとめ

波浪が大きく流電陽極の取付作業を実施できないなど、一部の期間で不通電の状態があり、その期間は鋼管杭の電位が防食電位よりも貴値になった。しかし通電中は防食電位よりも卑値になり、安定した防食状態にあった。また陽極からの発生電流も時間の経過とともに低下し、初期の50%以下にまで低減した。

以上の結果より、波浪が大きいなどの厳しい腐食環境であっても、流電陽極方式による電気防食は十分に機能することが明らかになった。

(2) 干満帯への防食効果

鋼構造物を海洋環境下で使用する場合、通常、流電陽極方式による電気防食が適用されている。没水部分には陽極から発生する電流が流入するため、この部分の鋼材は電気防食による十分な防食効果が得られることから、設計上の基準では、M.L.W.L.(平均干潮面)以下に電気防食が適用されている。しかし波浪海域においては、干満帯やH.W.L.(満潮面)以上にも波がかかり、その部分の鋼材表面も没水している時間が長いこと電気防食の効果が及ぶ可能性がある。しかしこれに関して定量的に評価した研究は見当たらないため、本試験では海水中に設置した陽極から流れる防食電流による効果が干満帯およびその上部のどの範囲にまで及ぶかを検討した。

試験対象鋼管杭は鋼管杭No.23とNo.30である。これらの鋼管杭は前述したように、干満帯から上部は無防食の状態である。防食の効果は鋼管杭の肉厚測定結果から判断した。測定範囲は-0.6～+5.0mである。図-3.19と図-3.20に現有肉厚を、図-3.21と図-3.22に暴露期間(21年間)の平均腐食速度を示す。なお平均腐食速度を算出する際は、初期肉厚を測定していないので公称肉厚12mmを代用した。以下、干満帯とそれより上部の範囲に分けて考察する。

a) 電気防食の効果

図-3.19と図-3.20の現有肉厚は各測定地点における15点の測定値を平均したものである。±0m(干潮面)以下は、暴露期間中没水しているため、この部分には電気防食の効果が及ぶと考えられる。注目すべき点は、干満帯部、すなわちH.W.L.～L.W.L.(+1.4～±0m)の範囲の現有肉厚が、いずれの鋼管杭においても常時没水しているL.W.L.以下の腐食速度と同様の値であったことである。したがって干満帯のほぼ全域に電気防食の効果が及ぶと考えられる⁷⁾。

次に図-3.21と図-3.22に示すように、暴露期間(21年)の平均腐食速度について述べる。現有肉厚の測定結果から予測されることであるが、電気防食の効果が及ぶと考えられるL.W.L.以下および干満帯(H.W.L.～L.W.L.)の平均腐食速度は小さく、鋼管杭No.23では約0.07mm/y、鋼管杭No.30では約0.03mm/yであった。電気防食の効果を見込める海水中においても、平均腐食速度はゼロにならなかった。これは、電気防食を開始する前の無防食期間(建設期間)の減厚分も含めて平均腐食速度を算出しているからと考えられる。約2～3年の建設期間に0.5～0.8mm程度の減厚が生じることは十分に考えられる。この減厚分を考慮すれば鋼管杭No.23とNo.30におけるL.W.L.以下の海水中および干満帯の電気防食開始後の平均腐食速度は、ゼロに近い値であったと考えられる。

以上のように、一般の港湾区域内とは異なり、常に波浪を受け続ける本試験施設の海洋環境では、海水中に取付けた陽極による防食効果は干満帯にまで及ぶことが考えられる。

b) 干満帯より上部の腐食傾向

図-3.21と図-3.22に示すように、いずれの鋼管杭においてもH.W.L.(+1.4m)より上部で、平均腐食速度は大きくなり、飛沫帯の+3.0m付近が最大となる。一般の港湾区域内での飛沫帯の腐食速度は0.3mm/y程度であると言われていた。鋼管杭No.23の海側およびNo.30の陸側の平均腐食速度は0.4mm/yを超えており、一般の港湾区域内における腐食速度より高い値を示した。

本試験施設では、港湾区域内と比べて腐食速度が最大になる位置に特徴がある。一般的にはH.W.L.の直上で最大になる場合が多い。本試験施設でも同様の傾向が見られるのであれば、H.W.L.は+1.4mなので、+2.0m付近が最大になるはずである。しかし実際には、+3.0m付近で平均腐食速度が最大となっており、これは波浪の影響と考えられる。前述したように本試験環境の有義波高は通常の港湾区域内に比べて高いため、高い位置にまで波しぶきがかかることになる。したがって+3.0m付近の腐食速度が最大にな

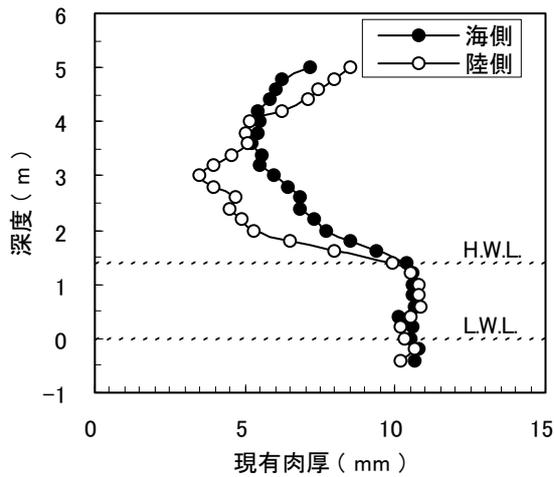


図-3.19 鋼管杭 No. 23 の現有肉厚

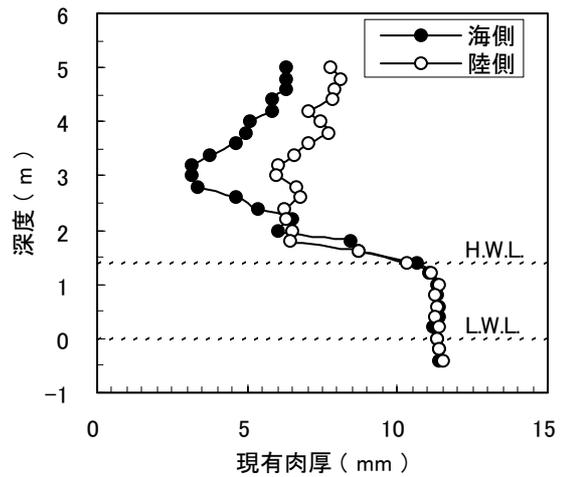


図-3.20 鋼管杭 No. 30 の現有肉厚

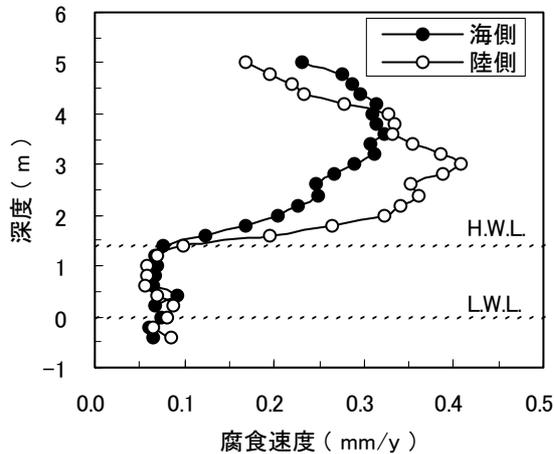


図-3.21 鋼管杭 No. 23 の腐食速度

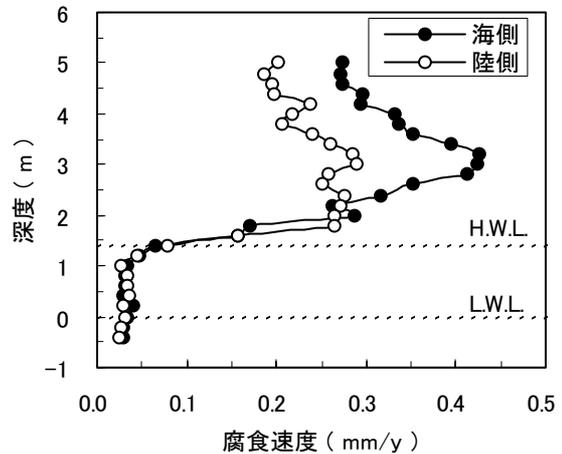


図-3.22 鋼管杭 No. 30 の腐食速度

ったものと考えられる。

また、平均腐食速度と測定方向の関係について述べる。図-3.21 と図-3.22 に示したように、鋼管杭 No. 23 では陸側の方が、No. 30 では海側の方が平均腐食速度は大きい。この理由として波向の影響が考えられる。

図-3.23 に 1991 年～1999 年間の波高および波向別の出現頻度図を示す。同図には肉厚の測定方向(位置)も示した。図-3.23 に示すように東北東あるいは東側からくる波の出現が多い。一般的には波のかかる部分の腐食が激しいので、鋼管杭 No. 30 では西南西側(陸側)よりも東北東側(海側)の平均腐食速度が大きくなったと考えられる。一方、鋼管杭 No. 23 では北東側(海側)と南西側(陸側)の平均腐食速度を測定している。東側からきた波は鋼管杭に当たり、波しぶきとなって南西側(陸側)に激しくかかるので、鋼管杭 No. 23 では、南西側(陸側)の平均腐食速度が北東側(海側)よりも大きくなったものと考えられる。

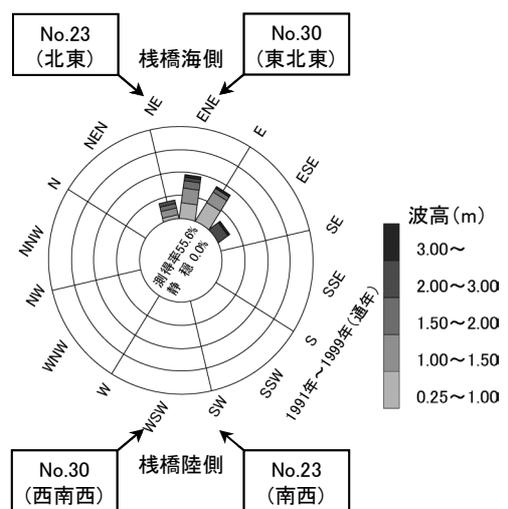


図-3.23 波高、波向の出現頻度と肉厚測定位置の関係 (矢印は肉厚測定位置)

c) まとめ

本試験施設は、港湾区域内とは異なり、高波浪環境下にある。このような環境では、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ことが認められた。ただし、単に没水するだけでなく、没水する時間に関係することを留意しなければならない。

当然のことながら飛沫帯から上部には防食の効果が認められなかった。また腐食速度が最大となる位置は、港湾区域内では満潮面の直上になるのに対し、本試験環境では、満潮面よりも約 1.5m 程度上部になることが明らかになった。

(3) 定電位法による電気防食試験

電気防食の適用に際しては、十分な防食効果を得るために、環境に見合った適切な防食電流と電位を常に維持し、管理する必要がある。特に考慮すべき点の一つは、適切な電位を維持しつつ防食電流密度を短期間に低減させることである。これを実現すれば、陽極の寿命を長くすることができる。防食電位の基準は-780mV (vs. Ag/AgCl-EL) であり、これより卑値であれば防食状態を維持できる。しかし、鋼管杭の電位(陰極電位)をどの程度まで卑値にすれば、防食電流密度を効率的に低減させられるかは明らかになっていない。そこで、どの程度の電位であれば防食電流密度の低減が得られるかを定電位試験によって検討した。

a) 各設定電位における電流密度の傾向

設定電位は-800mV, -850mV, -900mV の3段階とした。各設定電位における電流密度の傾向を表-3.3 に示す^{8,9)}。-800mV では、4 ヶ月経過後でも電流密度が低減する傾向は認められず、波浪の影響を受けて 100~120mA/m² の範囲で変動した。

表-3.3 各設定電位における電流密度の傾向
(電流密度の単位 : mA/m²)

	経過期間	設定電位 (vs. Ag/AgCl-EL)		
		-800mV	-850mV	-900mV
電流密度	2 ヶ月	100~120	100~120	70~90
	4 ヶ月	100~110		60~70
	6~8 ヶ月		70~90	
	10~12 ヶ月		65~70	
傾向		電流密度は低減せず	低減まで約1年を要す	4 ヶ月後には低減し定常値となる

-850mV に設定した場合は、4 ヶ月頃までは波浪の影響を受けながら大きく変動を繰り返していた。しかし 6~8 ヶ月頃から低減しはじめ、約 1 年後にほぼ定常状態に達した。

-900mV に設定した場合は、電流密度の低減傾向が顕著に認められ、4 ヶ月後には 60~70mA/m² と定常状態となっていることが確認された。

以上の結果より、-800~-900mV の設定電位の範囲では、より卑な値に設定した方が電流密度の低減が早い時期に始まるので、陽極の寿命も延命されるといえる。

b) まとめ

設定電位を-800mV, -850mV, -900mV の3段階として、定電位試験を行った。-900mV に設定したときの電流密度は最も速く低減し、定常電流密度は 60~70mA/m² であった。電気防食の設計を行う場合は、設定電位を-900mV 以下とすることが望ましい。

(4) サンドエロージョンに対する防食効果

サンドエロージョンに対する防食効果を確認するため、試験片による試験と磨耗カバーの切取りによる試験を実施した。

a) 試験片による試験

試験片の回収状況を表-A.6 に示す。試験片は 1 年後に右側(R), 8 年後と 9 年後に左側(L)を回収したが、消失あるいは海底面に埋没していたため、全てを回収することはできなかった。また、8 年後に回収した不通電試験片の 1 個 (No. 26, 水深-1m, 南西側) が、絶縁不良のため鋼管杭と電氣的に接続され、防食状態になっていたと考えられる。

回収した試験片は、質量減から (3.1) 式と (3.2) 式を用いて腐食速度と防食率を求めた。なお試験片の表面積は 31.4cm² である。

$$\text{腐食速度 (mm/y)} = \frac{\text{減量 (g)} \times 365(\text{day/year}) \times 10(\text{mm/cm})}{\text{鉄の密度 (g/cm}^3) \times \text{表面積 (cm}^2) \times \text{試験期間 (day)}} \quad (3.1)$$

$$\text{防食率 (\%)} = \frac{\text{不通電試験片の減量 (g)} - \text{通電試験片の減量 (g)}}{\text{不通電試験片の減量 (g)}} \times 100 \quad (3.2)$$

腐食速度と防食率を表-A.7 と表-A.8 に示す。また除錆処理後の試験片の表面状態は、写真-3.1 と写真-3.2 に示すように、8 年、9 年経過後の不通電試験片は、筋状に激し

く腐食し、端部は原形を留めていなかった。鋼管杭 No. 22 に取付けた通電試験片の表面状態は全て平滑で、電気防食の効果が十分に認められた。一方、鋼管杭 No. 26 の8年後と9年後の通電試験片の一部に腐食が認められた。これは、陽極の消耗により約1年間、無防食期間があったためと考えられる。

次に鋼管杭 No. 22 と No. 26 に設置した各試験片の腐食速度を図-3.24 に示す。鋼管杭 No. 22 の不通電試験片の腐食速度は、一般に言われている海水環境の腐食速度（約0.1mm/y）より大きく、0.25mm/y 程度であった。一方、鋼

管杭 No. 26 の腐食速度は鋼管杭 No. 22 よりも小さく、0.15mm/y 程度であった。鋼管杭 No. 22 は、鋼管杭 No. 26 よりも陸側に近く、砕波帯に位置していたため、波浪と流砂によって海生生物や腐食生成物が除去され、腐食速度が大きくなったものと考えられる。

鞘管付試験片の腐食速度は、ほとんどが海水環境の腐食速度よりも小さくなっていった。鞘管付試験片は、構造上流砂による付着物の除去作用の影響を受け難く、また、鞘管と試験片との間に砂や生物が入り込んだために酸素の供給が妨げられ、腐食速度が小さくなったと考えられる。

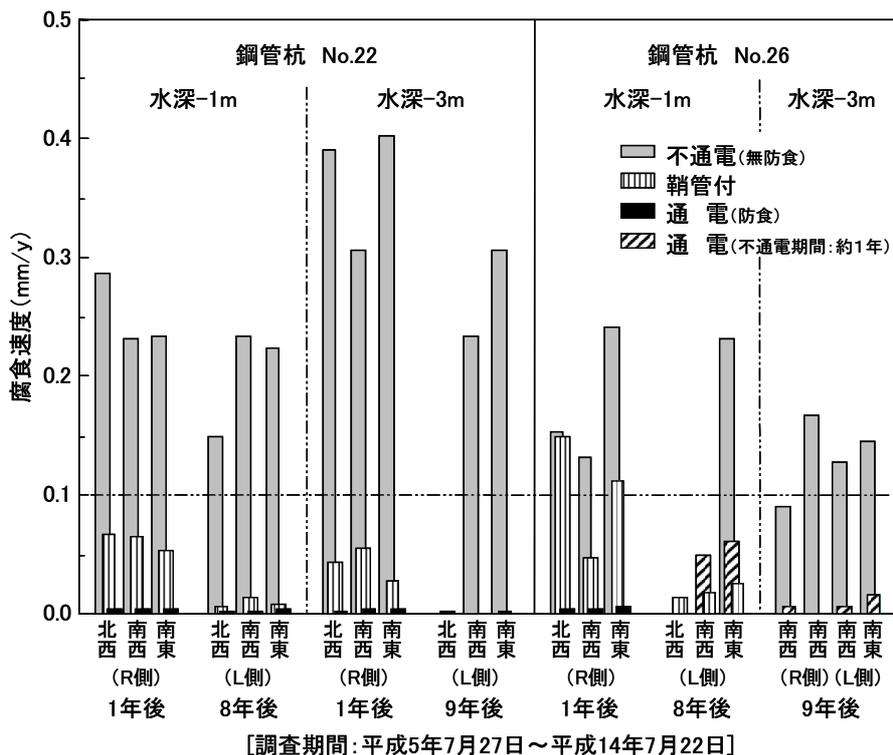


図-3.24 腐食速度 [鋼管杭 No. 22, No. 26]

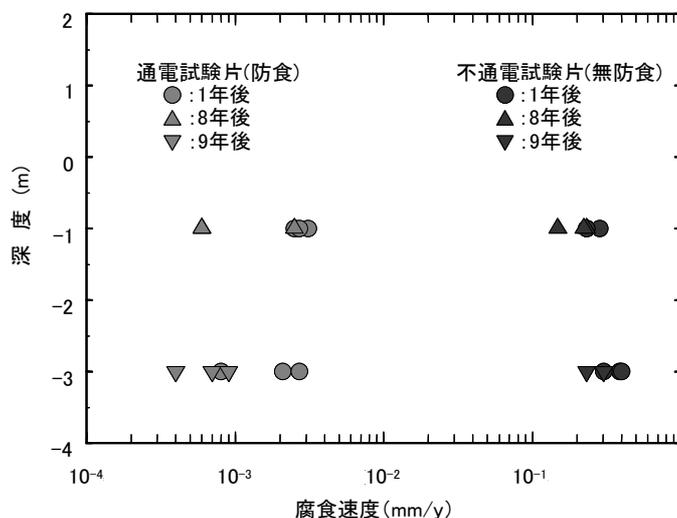
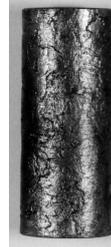
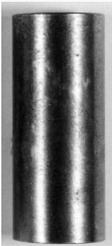
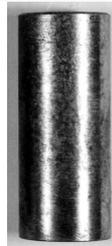


図-3.25 腐食速度 [鋼管杭 No. 22]

写真-3.1 除錆処理後の試験片の表面状態（1年後）（写真-B.5 参照）

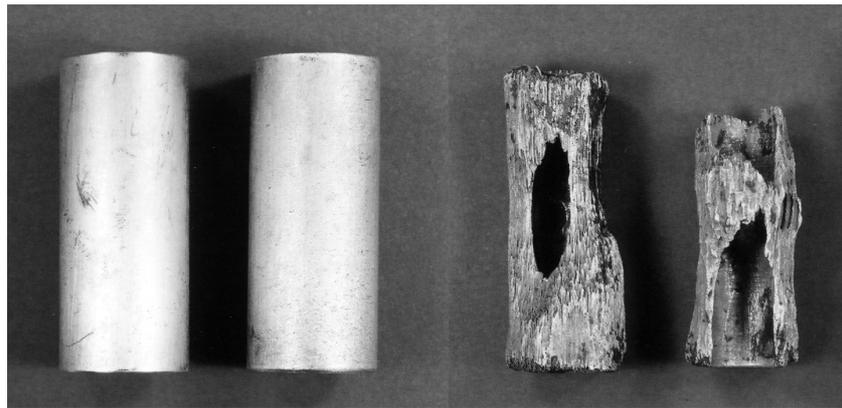
		鋼管杭 No. 22			鋼管杭 No. 26		
		北西側-R	南西側-R (陸側)	南東側-R	北西側-R	南西側-R (陸側)	南東側-R
水深 -1m 1年後	不通電試験片						
	鞘管付試験片						
	通電試験片						
水深 -3m 1年後	不通電試験片				埋没	埋没	埋没
	鞘管付試験片				埋没	埋没	埋没
	通電試験片				埋没	埋没	埋没

R : 右側 / L : 左側

写真-3.2 除錆処理後の試験片の表面状態 (8年後, 9年後) (写真-B.6 参照)

		鋼管杭 No. 22			鋼管杭 No. 26			
		北西側-L	南西側-L (陸側)	南東側-L	南西側-R (陸側)	南西側-L (陸側)	南東側-R	南東側-L
水深 -1m	不通電試験片				—	絶縁不良	—	
	鞘管付試験片				—		—	
	通電試験片				—		—	
水深 -3m	不通電試験片	消失						
	通電試験片						消失	

R: 右側 / L: 左側 *) 約1年間, 防食電位に達していない期間有り (陽極消耗)



a) 通电試験片(防食片)

b) 不通電試験片(無防食片)

写真-3.3 試験片の表面状態(9年過後)

[鋼管杭 No. 22, 水深-3m] (写真-B.7 参照)

図-3.25 に鋼管杭 No. 22 の不通電試験片と通电試験片の腐食速度を示す。通电試験片の腐食速度は 0.003mm/y 以下で、不通電試験片の約 1/100 であった。また防食率も 99% 以上と非常に高く表面状態も平滑で、サンドエロージョンに対する電気防食による効果が十分に認められた。また 9 年経過後の試験片の表面状態を写真-3.3 に示す。この写真からも通电試験片の電気防食効果が認められる。

b) 磨耗カバーの切り取りによる試験

鋼管杭 No. 17 と No. 22 の磨耗カバーを切り取り、腐食量を求めた。試験は 13 年経過時と 21 年経過時の 2 回実施している。腐食量の試験結果を表-A.9 に示す。また、図-3.26 ~ 図-3.33 に腐食速度と表面状態の写真を示す。なお腐食速度は磨耗カバーの初期の厚さから(3.3)式を用いて算出した。

$$\text{腐食速度 (mm/y)} = \frac{\text{磨耗カバーの初期厚さ (6mm)} - \text{厚み (mm)}}{\text{試験期間 (year)}}$$

(3.3)

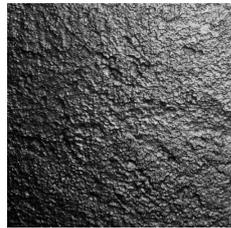
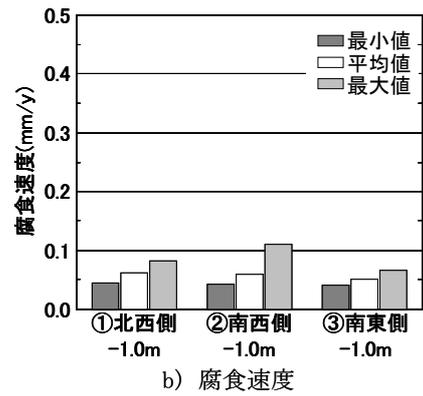
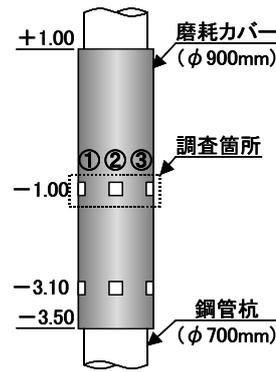
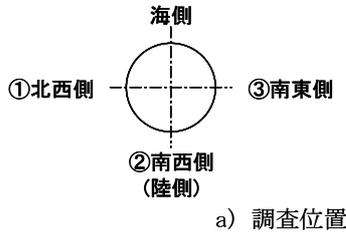
はじめに鋼管杭 No. 17 について述べる。1 回目の試験(13 年経過時)まで、この鋼管杭は無防食状態であった。鋼管杭 No. 17 の腐食速度は、水深-1.0m よりも-3.1m の方が大きく、一般に言われている海水環境における腐食速度(約 0.1mm/y) の 3 倍近い値になっていた。また貫通孔も 2 ヶ所で認められ、流砂による海生生物の除去作用の影響をかなり受けていたものと考えられる。2 回目の試験(21 年経過時)では、既に磨耗カバー下部の約半分がなくなり、水深

-1.0m でも貫通孔が数ヶ所認められた。一方、電気防食を適用していた鋼管杭 No. 22 については、腐食速度は非常に小さく、サンドエロージョンに対する電気防食による効果が十分に認められた。

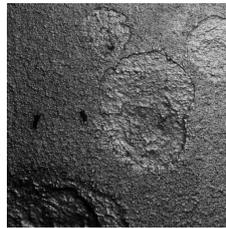
c) まとめ

試験片による試験と磨耗カバーの切り取りによる試験を実施した。不通電の場合の腐食速度は、概ね 0.1mm/y 以上で激しく腐食していたのに対し、電気防食を施した場合の防食率は概ね 95% 以上となり、腐食の痕跡も認められなかった。その結果、サンドエロージョンに対して電気防食は有効であることが明らかになった。

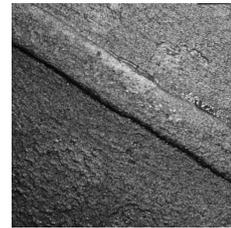
【鋼管杭No. 17 上部】
 試験期間 : 13年
 無防食期間 : 13年



①北西側



②南西側

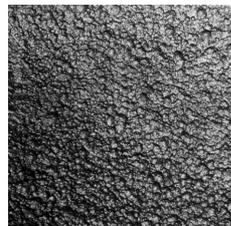
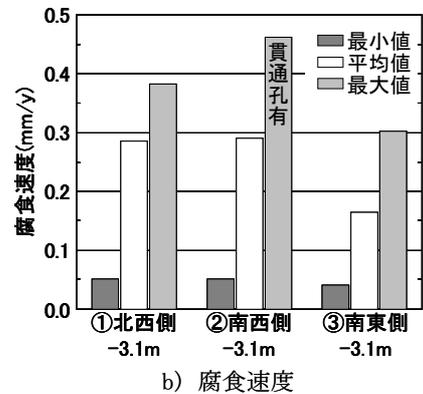
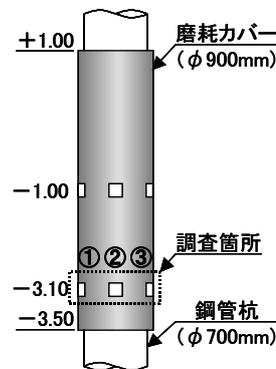
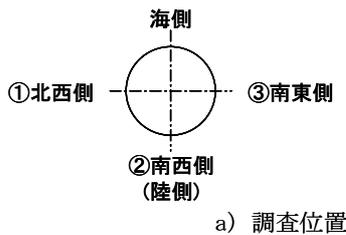


③南東側

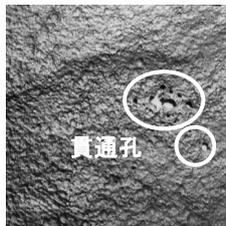
c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.26 鋼管杭 No. 17 上部, 水深: -1.0m (1 回目調査: 1996 年 7 月)

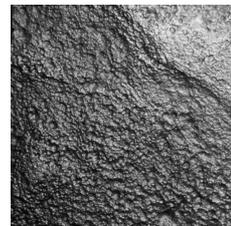
【鋼管杭No. 17 下部】
 試験期間 : 13年
 無防食期間 : 13年



①北西側



②南西側



③南東側

c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.27 鋼管杭 No. 17 下部, 水深-3.1m (1 回目調査: 1996 年 7 月)

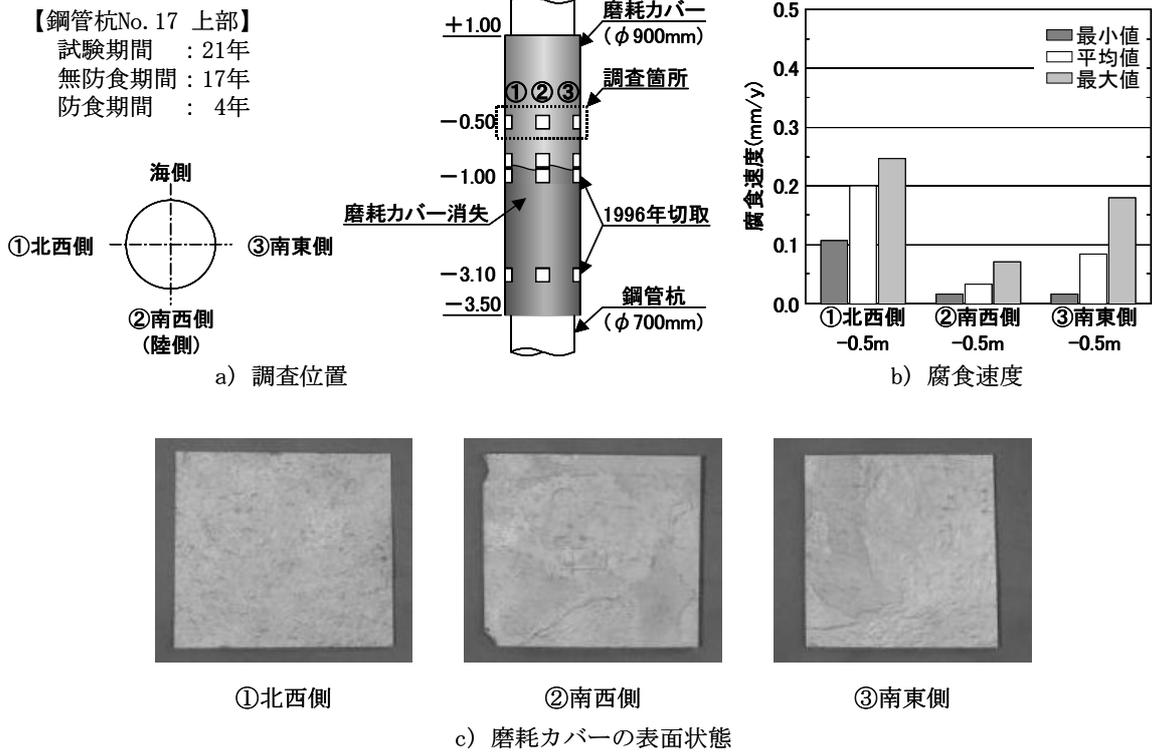


図-3.28 鋼管杭 No. 17 上部, 水深 : -0.5m (2 回目調査 : 2004 年 6 月)

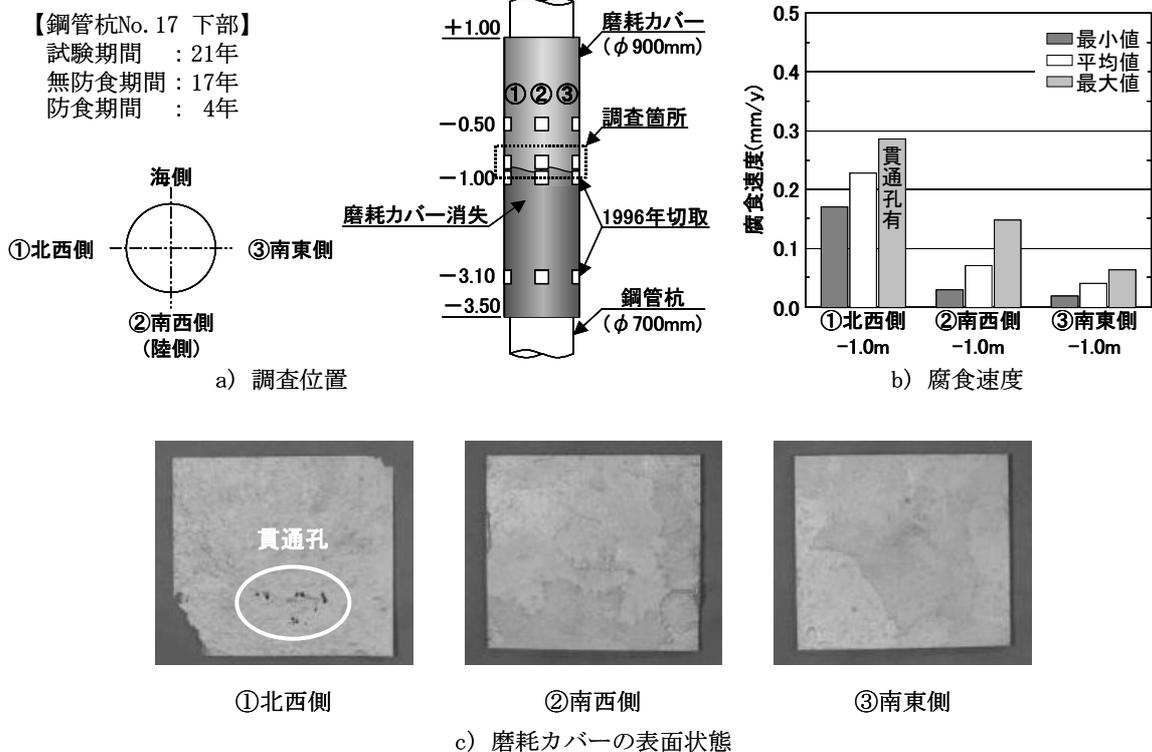
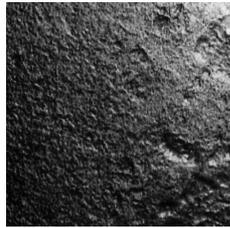
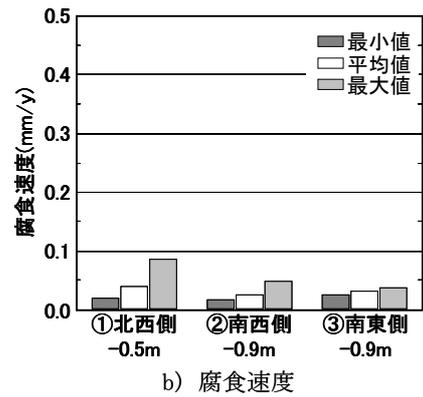
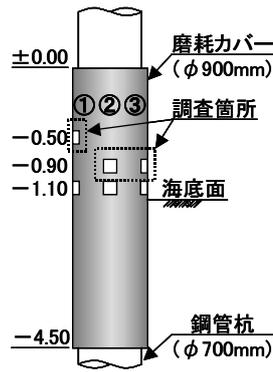
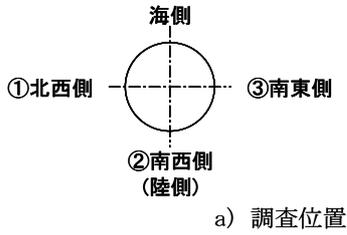
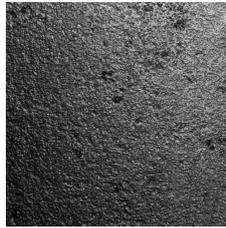


図-3.29 鋼管杭 No. 17 下部, 水深-1.0m (2 回目調査 : 2004 年 6 月)

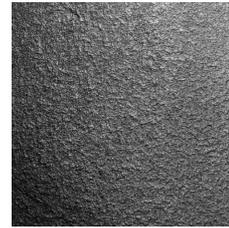
【鋼管杭No. 22 上部】
 試験期間 : 13年
 無防食期間 : 1年
 防食期間 : 12年



①北西側



②南西側

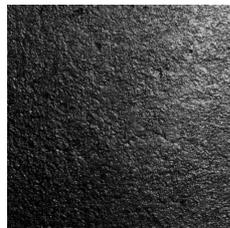
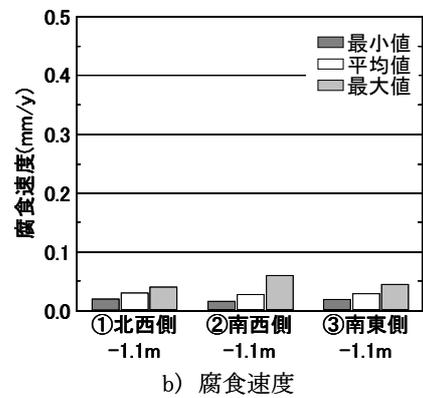
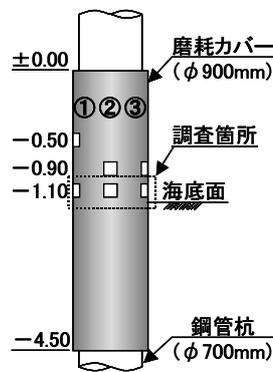
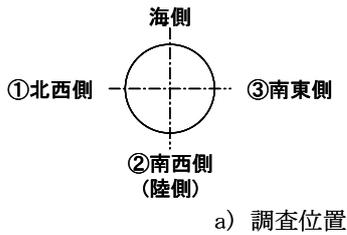


③南東側

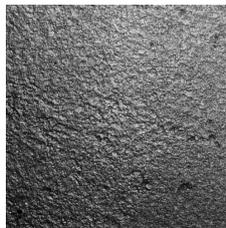
c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.30 鋼管杭 No. 22 上部, 水深: -0.5m, -0.9m (1回目調査: 1996年7月)

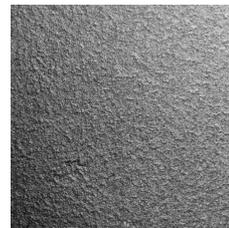
【鋼管杭No. 22 下部】
 試験期間 : 13年
 無防食期間 : 1年
 防食期間 : 12年



①北西側



②南西側

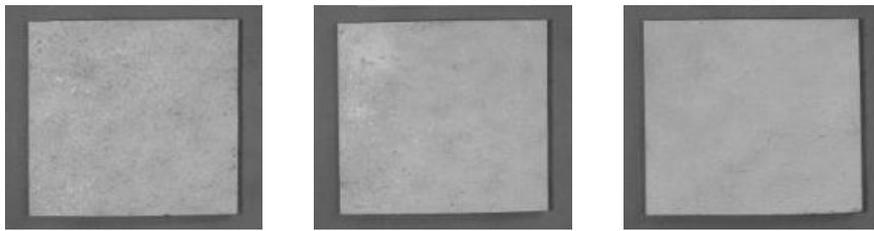
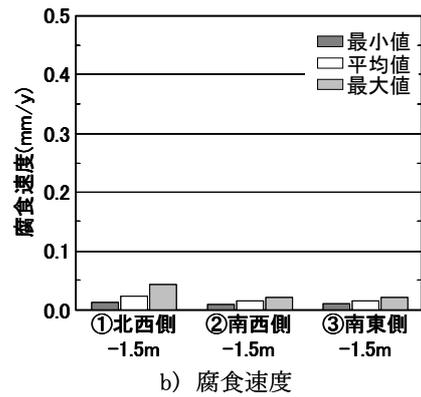
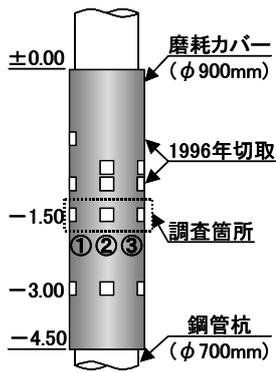
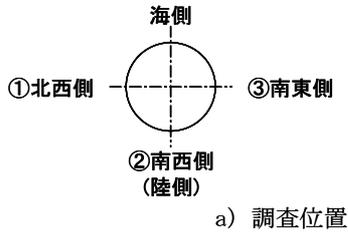


③南東側

c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.31 鋼管杭 No. 22 下部, 水深-1.1m (1回目調査: 1996年7月)

【鋼管杭No. 22 上部】
 試験期間 : 21年
 無防食期間 : 1年
 防食期間 : 20年

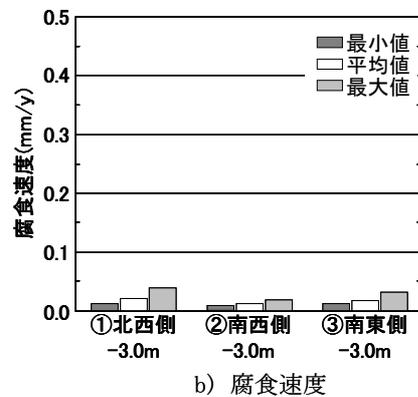
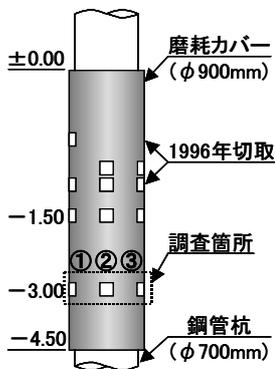
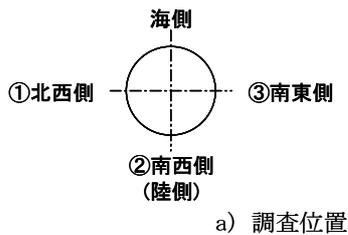


①北西側 ②南西側 ③南東側

c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.32 鋼管杭 No. 22 上部, 水深 : -1.5m (2 回目調査 : 2004 年 6 月)

【鋼管杭No. 22 下部】
 試験期間 : 21年
 無防食期間 : 1年
 防食期間 : 20年



①北西側 ②南西側 ③南東側

c) 磨耗カバーの表面状態

図-3.33 鋼管杭 No. 22 下部, 水深-3.0m (2 回目調査 : 平成 2004 年 6 月)

3.4 被覆防食工法

被覆防食工法を、(1)塗装・有機ライニング工法、(2)無機ライニング工法、(3)ペトロラタムライニング工法に分類し、それぞれの試験結果について述べる。主な試験内容は、外観観察、絶縁抵抗や付着力の測定、鋼材表面の素地の観察である。

(1) 塗装・有機ライニング工法

塗装・有機ライニング工法では、a)超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法、b)ポリエチレンライニング工法、c)水中硬化型ライニング工法、d)極厚マスチック防食工法について述べる。外観観察は基本的に毎年実施しており、その結果を表-3.4に示す。これ以外の結果等については、それぞれの工法別に述べる。

a) 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法

a-1) 外観観察結果

鋼管杭 No. K2 および No. K3 のいずれにおいても、塗膜の表面に軽度のチョーキングが生じていた。これは、強い紫

外線の影響によるものと考えられる。しかし全般的には、良好な塗膜外観と防食性を保持していた。

a-2) 絶縁抵抗

絶縁抵抗の経年変化を図-3.34 および図-3.35 に示す。施工当初の絶縁抵抗は非常に高いが、経年に伴い、水や塩化物イオンなどの腐食誘因物質が塗膜中に進入するため、徐々に抵抗値は減少するのが一般的である。しかし図-3.34、図-3.35 に示すように、実際には上昇している。

この理由として、測定の難しさが挙げられる。測定値には、塗膜への測定探触子の密着性や静電気、湿度や塗膜表面の水分等が影響する。これらの影響を除くよう、現状での最善の方法で測定した。

超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法の絶縁抵抗に関する基準値は、今のところ報告されていない。他の工法については基準値が存在する場合もあるので、これらを表-3.4 に示した。ポリエチレンライニング工法では、 $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上の場合に塗膜下の鋼は腐食していないといわれている¹³⁾。これを参考にすれば、超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法では、鋼

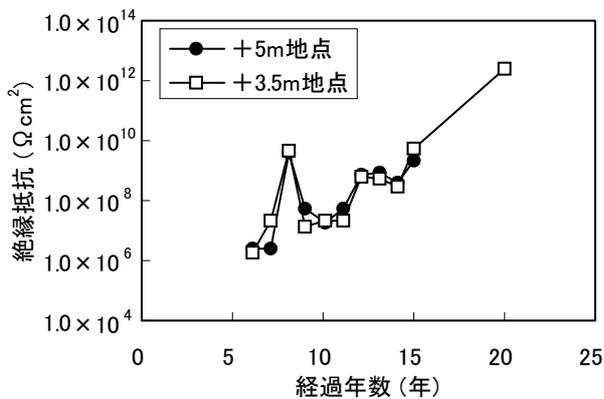


図-3.34 絶縁抵抗の経年変化 (鋼管杭 No. K2)

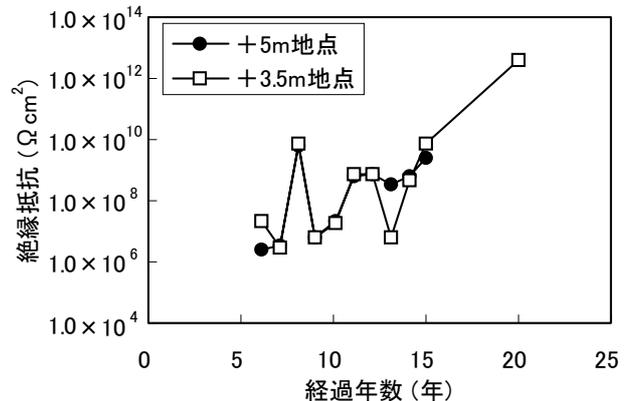


図-3.35 絶縁抵抗の経年変化 (鋼管杭 No. K3)

表-3.4 絶縁抵抗および付着力の基準値または参考値

塗料系		超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	ポリエチレンライニング工法	水中硬化型ライニング工法	極厚マスチック防食工法
試験項目					
絶縁抵抗 (Ωcm^2)		————	10^8 以上 ¹³⁾	————	————
付着力	アドヒージョンテスト (N/mm ²)	(コンクリートへの付着) 1.0 以上 ¹⁰⁾ 0.1 以上 ¹¹⁾ (原子力施設の床壁材の付着) 1.45 以上 ¹²⁾	————	3.9 ¹⁴⁾	4.9 ¹⁵⁾
	ピール試験 (N/10mm)	————	35 以上 ¹³⁾		

管杭 No. K2 と K3 のいずれの場合も 10 年経過以降、 $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上の値を示しており、防食性能が維持されていると考えられる。

a-3) 付着力

付着力と防食性能の相関性については、明らかな知見は存在しない。付着力が大きいと防食性能も高いと考えられるが、必ずしもそうではない。付着力が大きくなると塗膜内の内部応力も大きくなる傾向があり、内部応力が大きくと塗膜内の構造や塗膜厚が不均一になり、剥離が生じやすくなる場合もあるからである。このように付着力から塗膜の防食性能を評価することは難しいが、今後の研究課題という意味も含めて測定を実施した。その結果を表-3.5 に示す。

表-3.5 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法の付着力測定結果

鋼管杭 No.	方向	付着力 (N/mm ²)	
		9 年経過	20 年経過
K2	陸側	5.9	4.1
	海側	5.7	3.1
K3	陸側	5.3	3.9
	海側	6.1	4.1

測定は 9 年経過時と 20 年経過時に実施した。経年に伴い付着力は減少傾向にあるが、いずれの測定値も 3.1 N/mm² 以上の値を示している。現状では超厚膜型エポキシ樹脂塗装の鋼材への付着力に関する基準は存在しないが、表-3.4 に示すようにコンクリートへの付着力および原子力施設の床壁材(鋼材)の付着力に関する基準値があるので、これと比較してみると、最も厳しい基準値でも 1.45 N/mm² であり、本研究における測定値はこれらの値より大きな数値を示していた。

a-4) 塩化物イオンの浸透

塩化物イオンの浸透深さの測定結果を表-3.6 に示す。9 年経過時の +4.6m 地点、および 11 年経過時の +2.4m 地点では、塩化物イオンの浸透は認められなかった。20 年経過時の +3.2m 地点では、浸透深さが 25~200 μm であった。本測定値のみでは浸透速度を推測することはできないが、塗膜厚は約 2000 μm であり塩化物イオンが鋼材表面に到達するまでには、まだ相当の年数を要すると考えられる。

表-3.6 超厚膜型エポキシ樹脂塗装の塩化物イオンの浸透深さ測定結果

鋼管杭 No.	方向	9 年経過	11 年経過	20 年経過	
K2	陸側	+4.6m	+2.4m	+3.2m	約 25 μm
	海側	塩分の浸透は認められなかった	塩分の浸透は認められなかった	+3.2m	約 50 μm
K3	陸側	塩分の浸透は認められなかった	塩分の浸透は認められなかった	+3.2m	約 100 μm
	海側	塩分の浸透は認められなかった	塩分の浸透は認められなかった	+3.2m	約 200 μm

次に鋼管杭 No. K2 と K3 における塩化物イオンの浸透深さの差異について述べる。鋼管杭 No. K3 の方が、No. K2 に比べて、4 倍の浸透深さであることが認められた。いずれの塗膜厚も 2000 μm であるが、No. K3 へ適用している塗料は、No. K2 へ適用した塗料よりも厚塗りタイプであり、粘性を付与する目的で顔料を多く配合したものである。したがって塗膜が比較的疎な状態になるため、塩化物イオンの浸透深さが大きくなったものと考えられる。

測定方向と塩化物イオンの浸透深さの関係は、No. K2 と K3 のいずれにおいても、海側の方が陸側よりも 2 倍大きい値を示した。これは海側の方が海塩粒子の衝突量が多いので、浸透深さの差として表れたものと考えられる。

a-5) 鋼材表面の素地の観察結果

鋼材表面素地の観察は、9 年経過時と 20 年経過時に実施した。高さ +3.2m の地点で塗膜を 2×2cm の範囲で剥離し、鋼材表面の素地を観察した。その結果を表-3.7 に示す。海側と陸側の両方向から観察したが、いずれの場合も錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた。

表-3.7 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法の鋼材表面素地の観察結果

鋼管杭 No.	方向	9 年経過	20 年経過
K2	陸側	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた
	海側	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた
K3	陸側	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた
	海側	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた	錆の発生、その他の異状はなく、良好な防食性が保たれていた

a-6) まとめ

被覆材の絶縁抵抗と付着力を測定した結果、絶縁抵抗は概ね $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上、付着力は 3.0 N/mm^2 以上であり、いずれも防食性能を維持する値であった。また塩化物イオンの浸透深さは20年間の暴露期間に $25 \sim 200 \mu\text{m}$ 程度であった。

塩化物イオンの浸透は若干認められたが、鋼材表面の素地には腐食は発生しておらず、超厚膜型エポキシ樹脂塗装は良い防食性能を保持していた。外観上は塗膜の表面に軽度のチョーキングが発生していたが、この程度では防食性能に影響は生じないと考えられる。

一般的に、エポキシ樹脂をベースとした塗料は紫外線によるチョーキングが起りやすいことが知られている。したがって、紫外線の影響が大きな箇所には、上塗り塗料としてポリウレタン樹脂やフッ素樹脂をベースにした塗料等を組み合わせるなどの検討も必要である。

b) ポリエチレンライニング工法

b-1) 外観観察結果

表-A.3 に示したように、20年間の暴露試験期間を通して、傷やふくれ、剥離などの異状は認められず、良好な状態を維持していた。

なお各鋼管杭において、最適な補修技術を確認するため、被覆面の一部に人為的な傷を付け、その部分を補修している。これら補修部で異状が認められ、再補修を行っている。

b-2) 絶縁抵抗

鋼管杭 No. 31~35 について、+3.5m 地点と+5.0m 地点の絶縁抵抗を測定した。その結果を図-3.36 と図-3.37 に示す。

前述のように、ポリエチレンライニングの場合、絶縁抵抗が $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上ならば塗膜下の鋼材表面には腐食が認められないといわれている。図-3.36 と図-3.37 のように20年を経過した現在でも、 $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上の値を有している。絶縁抵抗を指標とした場合、ポリエチレンライニングは、防食性能を維持しているといえる。

b-3) ライニング材の膜厚

膜厚の測定結果を図-3.38 に示す。測定レベル、方向の違いと、膜厚のバラツキの間に、特に相関は見られなかった。建設当初の測定データがないため、経年変化に伴う塗膜厚の変化は把握できない。しかし20年経過後の現時点においても、測定値はいずれも製品仕様(2.5mm 以上)を満たしているため、20年間の暴露でも磨耗されないことが実証された。

No. 31, No. 32 杭の塗膜厚は、製品仕様を大きく上回っている。これは、スパイラル状に巻かれたポリエチレンライニングのラップ部の偏厚等によるものと考えられる。

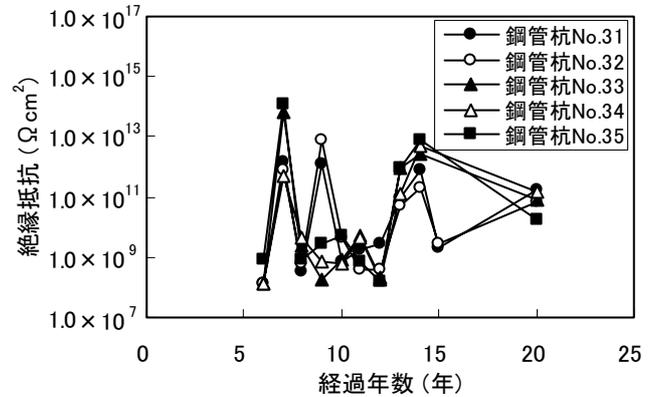


図-3.36 +3.5mにおける絶縁抵抗

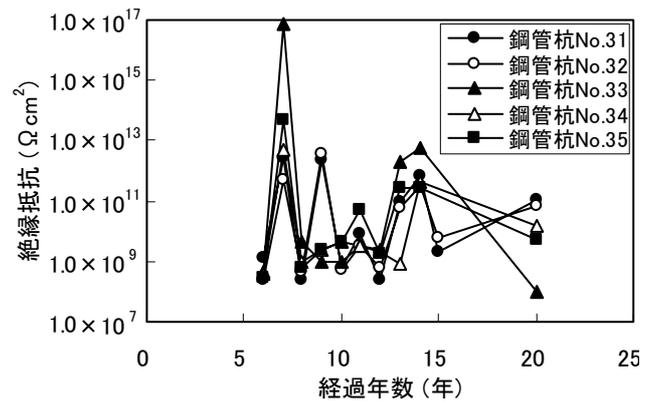


図-3.37 +5.0mにおける絶縁抵抗

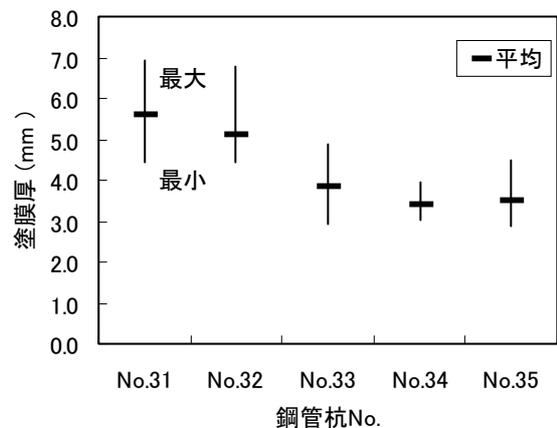


図-3.38 各鋼管杭の塗膜厚の最大値、最小値、平均値

b-4) 付着力

20年経過時点のピール強度の測定結果を表-3.8に示す。ピール強度は、199～265N/10mmの範囲の値を示した。なお初期値は274N/10mm、10年経過後の測定値は225N/10mmであった。これらの結果から、20年経過後も初期値と同程度の強度を保持しており、付着力は低下していないことが実証された。

b-5) ライニング材の分析結果

サンプル採取の際に発生したノッチ傷が比較的少ない鋼管杭No.31～33より採取したポリエチレンライニングの機械的性質(引張降伏強さ、引張破断強さ、引張破断伸び)、体積固有抵抗、吸水率を測定した。それぞれの結果を表-3.9、表-3.10、表-3.11に示す。

機械的性質の規定値は、引張破断強さが11.8N/mm²以上、引張破断伸びが300%以上である。また体積固有抵抗の規定値は1.0×10¹²Ωcm以上、吸水率の規定値は0.1%以下であり、試験の結果は以上の規定値を全て満たすものであった。なお、引張降伏強さについては規定値が見当たらなかった。

b-6) 鋼材表面の素地の観察結果

20年経過した時点において、ポリエチレンライニングの一部を剥がして鋼材表面の素地を観察した。ポリエチレンライニングは鋼材表面に強固に付着していた。また写真-3.4に示すように鋼材表面に錆の発生は認められなかった。なお、観察後は剥離部を超音波溶着法にて補修した。

表-3.8 ポリエチレンライニングのピール強度測定結果

鋼管杭 No.	測定位置	ピール強度 (N/10mm)
31	+4.50m	248
	+2.77m	255
32	+4.50m	265
	+2.77m	212
33	+4.50m	242
	+2.77m	212
34	+4.50m	206
	+2.77m	199
35	+4.50m	219
	+2.77m	238

表-3.9 ポリエチレンライニングの引張試験結果

鋼管杭No.	引張降伏強さ (kgf/cm ² (N/mm ²))	引張破断強さ (kgf/cm ² (N/mm ²))	引張破断伸び%
31	97.9 (9.59)	120.7 (11.83)	493.2
32	103.2 (10.11)	126.0 (12.35)	392.3
33	187.5 (18.38)	194.8 (19.09)	814.4

表-3.10 ポリエチレンライニングの体積固有抵抗測定結果

鋼管杭No.	試験片厚み (cm)	RV (Ω)	体積固有抵抗 (Ω cm)
31	0.604	7.7×10 ¹³	2.49868×10 ¹⁵
32	0.419	3.1×10 ¹³	1.45012×10 ¹⁵
33	0.374	3.1×10 ¹³	1.62460×10 ¹⁵



写真-3.4 ポリエチレンライニング下の鋼材表面 (鋼管杭 No. 32) (写真-B.8 参照)

表-3.11 ポリエチレンライニングの吸水率試験結果

鋼管杭No.	試験片厚み (cm)	吸水率 (%)
31	0.604	0.032
32	0.419	0.033
33	0.374	0.037

b-7) 鋼管杭の肉厚

測定結果を図-3.39 に示す。サンプル採取鋼材表面に錆は認められず、板厚の公差 (+規定せず, -0.8mm) を考慮すると、ほとんど腐食は生じていないものと考えられる。

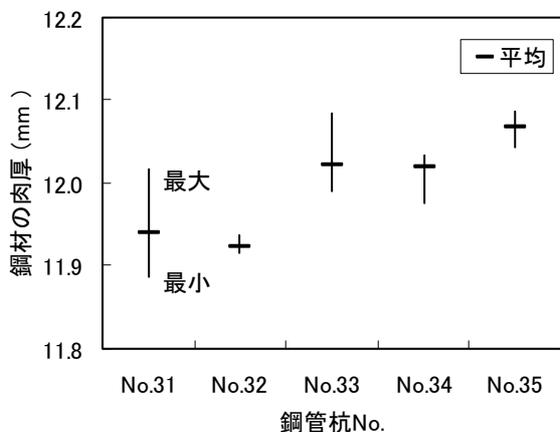


図-3.39 各鋼管杭の肉厚の最大値, 最小値, 平均値

b-8) まとめ

ポリエチレンライニングの絶縁抵抗, 膜厚, ピール強度および引張強度, 体積固有抵抗, 吸水率を測定した。いずれも防食性能上の問題は認められなかった。また外観上の異状もなく、鋼材表面素地にも腐食は生じていなかった。20年間の暴露試験期間中、良好な防食状態を保持していたものと考えられる。ただし、人為的に傷を付けた箇所を補修した部分には、腐食などの異状が認められた。今後は、補修技術について検討する必要がある。

c) 水中硬化型ライニング工法

c-1) 外観観察結果

表-A.3に観察結果を示す。なおチョーキングの判定は、JIS K 5400(塗料一般試験方法)および JIS K 5600-8-6(塗料一般試験方法)による方法を参考にしたが、風砂や波浪の影響で、白亜化した微粉が失われている状況にあり、JISの方法では正確な判定が行えなかった。そこで下記の基準にしたがい目視によって評価を行うこととした。

- A: 異状なし (初期の光沢を示す状態)
- B: 少々 (光沢が若干低下した状態)
- C: 小 (光沢がほとんど失われた状態)
- D: 中 (表面のみの樹脂成分が失われ、顔料が表面へ露出した状態)
- E: 大 (塗膜全体の樹脂成分がほとんど失われ、塗膜全体が崩壊した状態)

この基準にしたがえば、中程度(D)のチョーキングが生じていたといえる。チョーキングは、強い紫外線の影響で生

じたと推測される。しかし、全般的には良好な塗膜外観と防食性を保持していた。

c-2) 絶縁抵抗

経過7年~12年の間に、絶縁抵抗を測定した。その結果を図-3.40に示す。経過7年後では $10^5 \Omega \text{cm}^2$ 程度の値を示していたが、その後はおよそ $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 程度の値であった。

水中硬化型ライニング工法の絶縁抵抗に関する基準値は、現在のところ報告されていないが、表-3.4に示すように、ポリエチレンライニング工法の場合は $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上の塗膜下の鋼は腐食しないといわれている。これを参考にすると、水中硬化型ライニング工法の絶縁抵抗は概ね $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 程度の値を示しており、少なくとも7年経過時~12年経過時までの間は防食性能がほぼ維持されていたと考えられる。

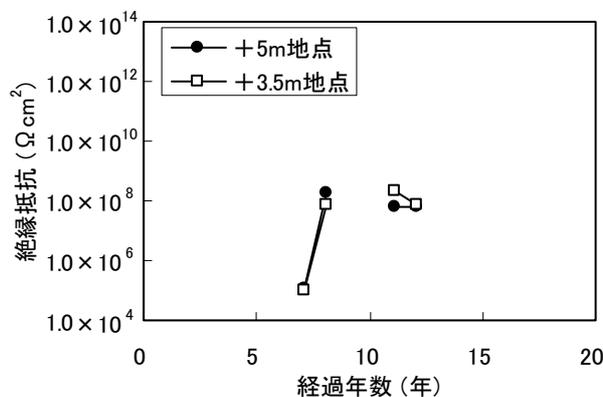


図-3.40 No. 27 絶縁抵抗の経年変化

c-3) 付着力

20年経過時の水中硬化型ライニングの付着力を表-3.12に示す。海側、陸側の2方向を測定したが、いずれも 2.6 N/mm^2 であった。表-3.4に示した付着力 3.9 N/mm^2 は、他の環境における水中硬化型ライニングの一施工例の実測値である。一般的に本ライニング材は、施工時に $1 \sim 5 \text{ N/mm}^2$ の付着力である。本試験環境のような厳しい海象条件下においても、施工後20年の間、施工時と同程度の付着力を維持していた。

表-3.12 水中硬化型ライニングの付着力測定結果

鋼管杭 No.	測定方向	20年経過時点の付着力 (N/mm^2)
18	陸側	2.6
	海側	2.6

c-4) 塩化物イオンの浸透

20年経過時の塩化物イオンの浸透深さを表-3.13に示す。20年経過しているが、塩化物イオンの浸透深さは約500 μm であった。水中硬化型ライニングの膜厚は5000 μm であり、鋼材表面に塩化物イオンが到達するまでには、まだ相当の年数を要すると考えられる。

表-3.13 水中硬化型ライニングの塩化物イオン浸透深さ測定結果

鋼管杭 No.	測定方向	20年経過時点の塩化物イオン浸透深さ	
18	陸側	+3.2m地点	約500 μm

c-5) 鋼材表面の素地の観察結果

5年経過時および20年経過時において、+3.2m地点の塗膜を2 \times 2cmの範囲で剥離し、鋼材表面の素地を観察した。鋼材表面には錆は発生しておらず、塗膜等にも異状は認められず、良好な防食状態を維持していた。

c-6) まとめ

水中硬化型ライニングの絶縁抵抗と付着力を測定した結果、絶縁抵抗は概ね $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 程度を有しており、付着力は2.6N/mm 2 と施工時と同程度を維持していた。塩化物イオンは全膜厚5000 μm 中の500 μm までしか浸透していなかった。また鋼材表面の素地にも腐食は生じていなかった。

外観上、中程度のチョーキングが観察されたが、この程度では防食性能に影響は及ぼさないと考えられる。

d) 極厚マスチック防食工法

d-1) 外観観察結果

表-A.3に示すように、17年経過以降、劣化(ふくれ、われ、はがれ、錆)が認められた箇所は、被覆材を打ち継ぎした際のパテ充填部である。また干満帯の劣化箇所は、1995年に塗膜を剥がして鋼材表面を観察した部分であり、その際の補修が不十分であったため、劣化が進行したものと考えられる。

d-2) 絶縁抵抗

6年経過後から17年経過時まで絶縁抵抗を測定した。その結果を図-3.41に示す。ポリエチレンライニング工法の場合の $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上という値を参考にすると、絶縁抵抗は概ねこの値以上を示しており、防食性能がほぼ維持されていると考えられる。

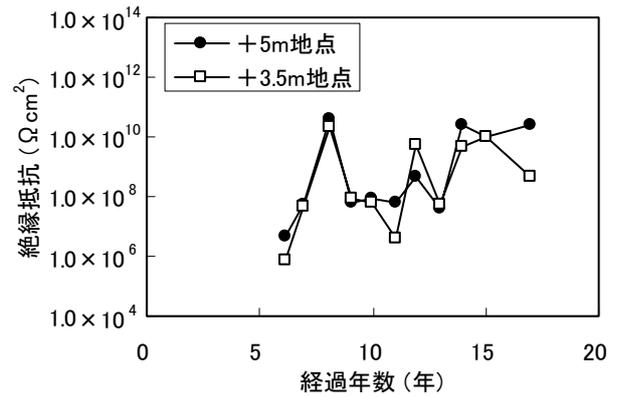


図-3.41 絶縁抵抗の経年変化鋼管杭 (No. 18)

d-3) 付着力

20年経過時の極厚マスチックの付着力を表-3.14に示す。鋼管杭 No. 27については、0.65~2.70N/mm 2 の範囲の値を示した。No. 28では、0.40~3.50N/mm 2 の範囲であった。

極厚マスチックの付着力の一例として、4.9N/mm 2 という値が報告されている¹⁵⁾。いずれの鋼管杭においても、これより低い値であった。この原因として、素地調整が十分でなかったことが考えられる。本工法の素地調整は、手工具および動力工具を使用してISO St3に準拠した仕上げを行った。しかし付着力が低い値であったことは、素地調整に問題があったためと考えられる。

表-3.14 極厚マスチックの付着力測定結果

鋼管杭 No.	測定方向	測定位置	測定回数	付着力 (N/mm 2)
27	海側	+5.0m	1	1.70以上
			2	1.20以上
		+3.5m	1	1.00以上
			2	0.65以上
	陸側	+5.0m	1	2.70以上
			2	1.25以上
3			2.10以上	
		+3.5m	1	—
28	海側	+5.0m	1	1.50以上
			2	1.60以上
			3	1.75以上
		+3.5m	1	1.35以上
			2	0.40以上
	陸側	+5.0m	1	3.50以上
		+3.5m	1	3.50以上

d-4) 鋼材表面の素地の観察

経過年数 5 年, 9 年, 20 年の時点で, +5m の位置における塗膜を 5×5cm の範囲で剥離し, 鋼材表面の素地を観察した。陸側と海側の 2 方向を観察したが, いずれの場合も, 塗膜の密着性は非常に良く, 防食状態は良好であった。

d-5) まとめ

絶縁抵抗は概ね $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上を示しており, これを指標とすれば防食性能が維持されているといえる。しかし付着力については低下している部分もあった。付着力の低下は, 素地調整が不十分であったためと考えられる。したがって今後の素地調整は, ISO St3 以上とし, 素地面が金属光沢になるまで, 入念に処理する必要がある。またパテ充填部は特に素地調整を入念に行い, 樹脂の接合面の汚れ等を洗浄によって除去し, プライマーを塗布した後に充填する必要がある。充填の際に, パテを強い力で押し込むことによって, 界面が十分に接着されれば, 水分の浸透経路を遮断することができると思われる。

(2) 無機ライニング工法

無機ライニング工法では, a) 電着工法, b) CRUS 工法について述べる。毎年実施している外観観察の結果を表-A.4 に示す。これ以外の結果等については, それぞれの工法別に述べる。

a) 電着工法

a-1) 外観観察結果

試験対象は鋼管杭 No. 9~11 である。鋼材表面の試験等のために被覆材の一部を剥離した箇所を除けば, 特に損傷などは認められなかった。しかし, 21 年経過時の調査では鋼管杭 No.9 において, 陸側の干満帯上部に数カ所の点錆が認められ, また, 陸側と海側の干満帯中央部には錆汁が見られた。

a-2) 電着物の成分分析

写真-3.5 に各鋼管杭の海面近傍 (M. S. L. 付近), L. W. L. 付近および -0.5m 付近の 3 カ所から, 通電停止 2.4 ヶ月後に採取した電着物の表面と裏面の外観を示す。No. 9 および No. 10 ではいずれの深度でも電着物が金網によく固着していることがわかる。電着物の裏側に赤錆の付着が一部見られるが, これは電着前に生じていた鋼管杭表面の錆が, 電着物を採取する時に電着物と一緒に剥離したものである。

写真-3.5 に示した各電着物について化学分析を行なった。表-3.15 は化学分析結果であるが, 電着物の化学成分は CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ および SiO_2 がほとんどで他に Al_2O_3 とごく微量の Fe_2O_3 を含んでいることがわかった。試験海域は

写真-3.5 電着物の外観状況 (写真-B.9 参照)

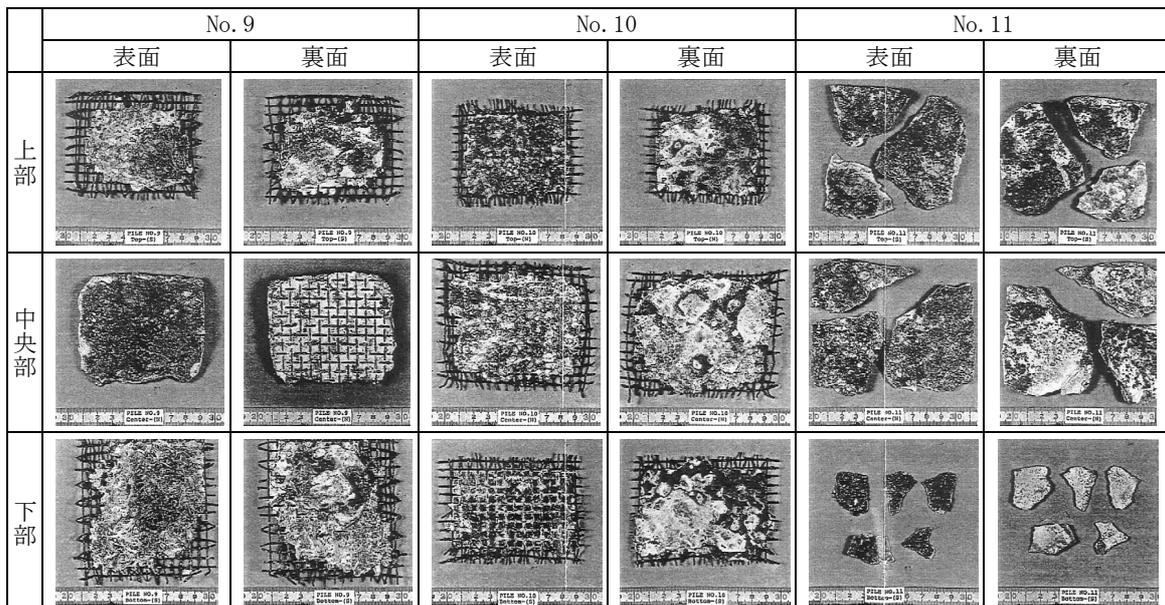


表-3.15 各鋼管杭の電着物の採取位置と化学組成 (単位: %)

鋼管杭No.	位置	CaCO ₃	Mg(OH) ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂
9	海面近傍	35.8	32.3	15.7	5.5	1.8
	中間部	30.4	34.7	18.4	6.1	1.6
	海底近傍	39.9	32.8	13.1	4.4	2.3
10	海面近傍	36.8	27.5	16.1	5.5	6.7
	中間部	34.2	29.2	17.3	6.1	4.3
	海底近傍	38.5	15.8	20.7	6.0	12.7
11	海面近傍	43.3	27.8	14.3	4.5	2.0
	中間部	31.6	37.1	17.8	5.2	2.0
	海底近傍	39.1	14.1	33.4	6.0	1.7

砂の動きが激しいので電着物の析出過程で砂が取り込まれやすいため、砂の成分である SiO₂ が多かったものと思われる。

電着物の主成分である CaCO₃、Mg(OH)₂ と電着物の採取位置との関係を図-3.42 に示す。図-3.42 に示すように CaCO₃ は海面近傍と海底近傍で多く、中央部で少ない。Mg(OH)₂ は CaCO₃ と逆に海面近傍と海底近傍で少なく、中央部において多い。これは海面近傍、中央部および海底近傍において電位分布が異なり中央部の電流密度が大きく、海面近傍と海底近傍では電流密度が小さくなったためと思われる。したがって、電着層の組成を均一に保つためには電位分布が均等になるように電極の配置や個数を調整することが必要である。

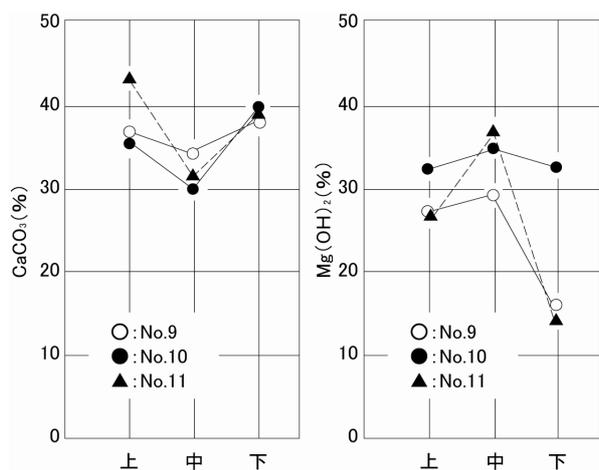


図-3.42 各鋼管杭の電着物の採取位置と CaCO₃、Mg(OH)₂ の関係

電着物の組成比率 (CaCO₃/Mg(OH)₂) は、材料強度の指標となる。電着物は鋼管杭 No. 11 の平均水面 (M. S. L. +0.89m) 付近から採取し、組成比率の経年変化を測定した。その結

果を表-3.16 に示す。施工直後、16年後、21年後ともに組成比率 (CaCO₃/Mg(OH)₂) は 1.55 であり、施工後 21 年間ほとんど変化はない。したがって電着物の物理的強度は安定していると判断される。

表-3.16 電着物の組成比率 (CaCO₃/Mg(OH)₂)

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

a-3) 電着物の耐久性

電着物の耐久性の指標となる付着力、減耗量、細孔構造の分析結果を述べる。

付着力については定量的に測定することが困難であるが、多くの室内実験から経験的に、①剥離に要する力、②剥離した電着物の大きさ、③剥離する箇所を3つの要素から、定性的に評価できることを見出している。なお、③剥離する箇所とは、電着物が電着物層内で剥離するか、または電着物と鋼材の間で剥離するかを面積割合で表わしたものである。本試験では、次に示す定性的な判断基準で付着の状態を評価した。

- ・付着力 (小) ;
 - ①スクレーパで楔を入れた手動操作で容易に剥離
 - ②電着物のかけらの大きさは平均約 100mm 以上
 - ③電着物間で剥離する面積割合が約 10% 以下
- ・付着力 (中) ;
 - ①スクレーパで楔を入れた手動操作を繰り返すことで剥離
 - ②電着物のかけらの大きさは平均約 50~100mm

- ③電着物間で剥離する面積割合が約 50%以下
- ・付着力 (大) ;

- ①楔を入れたスクレーパをハンマーで叩くことで剥離
- ②電着物のかけらの大きさは平均約 10~50mm
- ③電着物間で剥離する面積割合が約 50%以上

21年経過時点における鋼管杭 No. 11 の電着物の付着力試験では、スクレーパによる手動操作では剥離できず、楔を入れハンマーで叩くことにより、はじめて電着物を剥離することができた。また鋼材表面の素地から剥離することは少なく、電着物の大半は電着物層内で剥離し、剥離した小片の大きさは、約 10~30mm であった。定性的な判断基準によれば、20年間の暴露後も、大きな付着力を維持していると考えられる。

付着力は鋼管杭の素地調整に影響されることも考えられる。電着工法の施工前は、鋼管杭表面に赤錆が薄く見られたが、通電処理の過程で表面の還元作用によって SIS St2 以上に金属の素地が見られる状態となった。そのため、素地調整が SIS St2 以上であれば、付着力の低下は少ないといえる。

次に電着物の減耗量について述べる。施工直後と 16 年経過時点において、電着物の厚さを測定した。鋼管杭 No. 11 の平均水面 (M. S. L. +0.89m) 付近における約 20×20cm の面から、3~7cm 大の電着物の小片 5 個を採取し、これらの厚さをノギスで測定した。その結果を表-3.17 に示す。

電着物の減耗量は約 16 年間で平均約 3.3mm であり、年間の平均減耗量は約 0.21mm となる。砂の移動や砂の巻上げが起こる海象条件の厳しい砕波帯の流砂海域にもかかわらず、電着皮膜の減耗量は少ない。その理由としてピッカー硬度が 230 以上と貝殻と同程度で非常に硬いためと考えられる。

表-3.17 電着皮膜厚さの変化

採取箇所	時期	施工直後	21 年後	減耗量 (21 年間)
+1.4~+0.8m		3~7mm	2~4mm	1~3mm
+0.8~±0.0m		7~9mm	4~6mm	約 3mm
±0.0~-0.5m		9~7mm	6~4mm	約 3mm

鋼管杭 No. 11 の電着物の細孔構造 (全空隙量, 平均細孔半径, 50%細孔半径) の測定結果を表-3.18 に示す。

a-2) で述べたように電着物の材料強度の指標である組成比率 (CaCO₃/Mg(OH)₂) は 21 年間ほとんど変わっていないが、電着物の全空隙量は約 30%, 50%細孔半径と平均細孔半径は約 21~26%減少した。つまり電着物は経年的により緻密になっている。

以上のことから電着皮膜の減耗は認められたが、付着力は低下しておらず、また経年的に緻密になり硬くなっていると言われている時効硬化も確認された。砂の移動や巻上げ等が少ない港湾区域内では、電着皮膜の年間の減耗量はほとんど無視できる程度に小さくなると考えられる。この点を考慮すれば、電着物は耐久性に優れた無機系材料であるといえる。

a-4) 電着物の防食効果

鋼材表面の素地の観察では、鋼管杭 No. 11 を試験対象とした。+1.3m および +0.3m の深度における電着物を除去して鋼材表面を観察した。施工後 1 年 7 ヶ月では電着物で覆われていた鋼材表面にいずれも金属の素地光沢が見られ、また平滑であり腐食は認められなかった。また黒く見られる部分が散見されたが、これは黒色酸化皮膜であり、鋼管杭の表面が電着施工によってアルカリ性になるために生成したものと考えられる。黒色酸化皮膜は赤錆の酸化物と異なり安定した酸化物皮膜であり、鋼材に対する防食効果を有する。

施工から 16 年後と 21 年後にも鋼材表面の素地の観察を実施した。いずれも鋼管杭の表面は金属の素地光沢を呈しており、腐食や孔食による窪みなどの形跡は認められなかった。

次に鋼管杭の肉厚の測定結果を表-3.19 に示す。初期の

表-3.18 電着物の細孔構造分析

測定項目	全空隙量	平均細孔半径	50%細孔半径
経過年数	(cc/g)	(Å)	(Å)
施工直後	0.176	182.2	187.1
21 年後	0.123	134.6	148.0

表-3.19 電着工法の肉厚測定結果 (鋼管杭 No. 11)

測定項目	肉厚 (mm)				施工前の肉厚 (ミルシート)	肉厚の平均減量
	深度 +1.40m	深度 +0.50m	深度 ±0.00m	深度 -0.20m		
経過年数						
16 年経過後	—	15.5	15.6	15.8	16.0±0.4	0.37
21 年経過後	16.2	—	—	—	16.0±0.4	0

肉厚を測定していないため、肉厚の減少を定量的に表わすことはできないが、鋼管杭の製造時の肉厚（ミルシート）は $16.0 \pm 0.4\text{mm}$ であり、これをもとに検討した。表-3.19 から 16 年後では肉厚が若干減少しているように見えるが、施工前の肉厚 ($16.0 \pm 0.4\text{mm}$) の許容範囲におさまっており、鋼管杭は防食状態が保たれていたと考えられる。

a-5) まとめ

電着物の物理的強度の指標となる組成比率 ($\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$) は、21 年間の試験期間中、ほとんど変化せず安定していた。また、砂の移動や巻上げが起こる厳しい条件下にもかかわらず、電着物の年間の平均減耗量は約 0.21mm と小さく、経年的に緻密になり硬くなっていくという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と考えられる。ただし 21 年経過時に干満帯の一部に点錆等が認められたので、今後、経過を観察し、その原因を究明する必要がある。

b) CRUS 工法

b-1) 外観観察結果

施工から 12 年目までは、外観上、コンクリート表面に 2~3mm の減耗が見られたものの、特に錆汁、ひび割れ、その他の損傷は見られなかった。

しかし、13 年目に当たる 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 1~3mm 程度のひび割れが発見された。このため、1998 年の調査の際に、上端より 350mm の範囲についてコンクリートを撤去し、コンクリートを打設し直した。その際に、コンクリート内部鉄筋および鋼管杭本体を観察した。

ひび割れはコンクリート表面から斜め上方に向かって最上部の横鉄筋の位置を通して鋼管杭まで達しており、ひび割れより上部の鋼管杭には発錆が見られたが、ひび割れより下部の鋼管杭および内部鉄筋に腐食の発生箇所は見られなかった。また、撤去したコンクリートについて表面、割裂面を観察したが、異状は認められなかった。ひび割れが発生した原因としては、ひび割れより下部のコンクリートと比較して、コンクリートそのものが脆い状態であったため、施工時の養生不備により強度不足が発生していたこと、ひび割れより上部の鋼管杭表面に発錆が見られたため、この膨張圧にコンクリートが耐え切れなくなったことなどの複合的な要因が考えられる。

ひび割れよりも上部を補修した以降、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。

表-3.20 に 1984 年の調査開始時および 1998 年のコンクリート打ち直し時のコンクリートの配合を示す。

b-2) コンクリートの強度

+1.1m の位置 (材令 21 年) および +0.7m の位置 (材令 6 年) で被覆コンクリートの海側面、陸側面について、直径 5cm のコアサンプルを採取し、コンクリートの圧縮強度試験および静弾性係数試験を行なった。なお試験は、JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠した。

圧縮強度は、表-3.21 に示すとおり材令 21 年のもので 24.23N/mm^2 および 25.62N/mm^2 、材令 6 年のもので 39.98N/mm^2 であり、いずれの値も設計強度である 24N/mm^2 を満足しているが、材令 21 年のものはわずかに上回る程度である。圧縮強度については、今後年数を重ね、データを累積することにより強度の経年変化等のデータを得られるものと考えられる。

表-3.20 CRUS 工法で使用したコンクリートの示方配合

打設日	1984. 7. 27	1998. 7. 9	
フロー (cm)	50	50	
空気量 (%)	4.8	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 (ml/m^3)	5.25	4.67
水中不分離性混和剤 (kg/m^3)	3.8 ^{*1}	2.5 ^{*2}	
高性能減水剤 ($1/\text{m}^3$)	4.75 ^{*3}	10 ^{*4}	

※1 シーベターAD ※2 アスカクリン
 ※3 UMB-M NL-4000 ※4 レオビルド UC-150

表-3.21 CRUS 工法の被覆コンクリートの圧縮強度および静弾性試験結果

コンクリート採取位置	+0.7 海側 (a)	+0.7 陸側 (b)	+1.1 海側 (c)
材令	21 年		6 年
平均直径 (mm)	45.42	45.40	45.25
平均高さ (mm)	68.93	64.48	91.56
質量 (g)	241.0	228.9	347.1
見かけ密度 (g/cm^3)	2.16	2.19	2.36
圧縮強度 (N/mm^2)	24.23	25.62	39.98
静弾性係数 (kN/mm^2)	—	25.03	30.03

コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に示す値（普通コンクリート）および ACI の提案式と比較したものを図-3.43に示す^{16, 17)}。コンクリート標準示方書に示された数値は、全国的に調査した結果を平均したものである。この数値および ACI の提案式と今回試験したコンクリートの値を比較しても大きな差異は見られず、通常施工されているコンクリートと比較して物性的には変わらないものであると考える。

水中不分離性コンクリートの弾性係数は普通コンクリートと比べて若干小さくなるとされているが、本試験に用いたコンクリートについては普通コンクリートとの差異は認められなかった。また、アルカリシリカ反応を起こしたコンクリートは、静弾性係数が小さくなる傾向を示すとされているが、この傾向も見られないことから、1997年に発見されたひび割れは、アルカリシリカ反応によるものではないと考えられる。

b-3) コンクリートの中性化

物性試験を行なったコアおよびコアの採取後の孔を使用して中性化試験を行なった。+1.1m(材令6年)の箇所は、コンクリート表面まで変色が観察され、中性化試験の結果は全箇所0cmであり、中性化は認められなかった。中性化試験の変色している様子を写真-3.6に示す。また、+0.7m

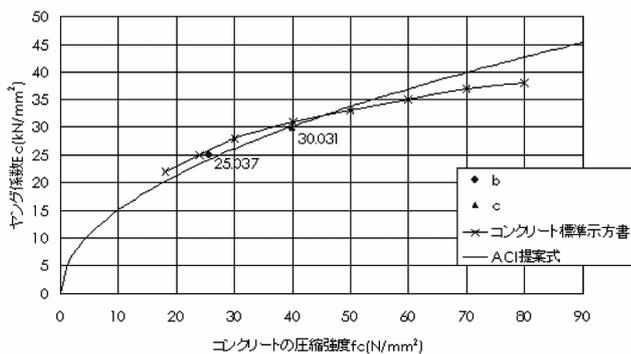


図-3.43 コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係

(材令21年)の箇所は毎年の調査時に付着海生生物をケレン棒で除去する際にコンクリート表面を同時に削り取ってしまっているが、これによる減量が約2~3mmで、この内側に約2.0mmの着色しない領域があり中性化深度は5.0mmと判定した。

中性化試験の結果は、上記のとおり材令で約21年経過した+0.7mの箇所でも5.0mm程度であった。中性化の進行速度の計算に一般的に使用する岸谷孝一博士の理論式およびコンクリート標準示方書〔維持管理編〕による中性化の進行予測式と比較したものが図-3.44である¹⁸⁾。

岸谷博士の理論式は陸上の建築等に使用されるコンクリートを対象とした理論式であるため、これと比較するといずれの値も極めて小さい値を示している。また、コンクリート標準示方書による中性化進行予測と比較すると、これと近い数値を示しており、この予測式を延長すると100年後においても10mm程度の中性化深度となる。

このように中性化深度が小さいのは、コアサンプルの採取位置が干満帯に位置し、没水している時間が長いことから、大気中の炭酸ガスに曝される時間が限られているためと考えられる。

被覆コンクリートの内部鉄筋の位置は表面から80mmであるため、干満帯以下の内部鉄筋への中性化の影響は極めて小さいものと思われる。

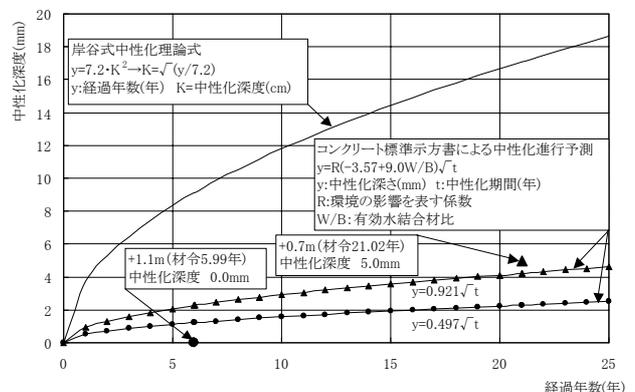
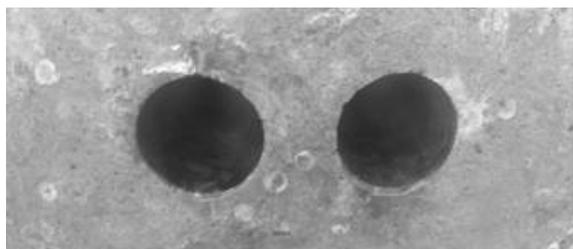
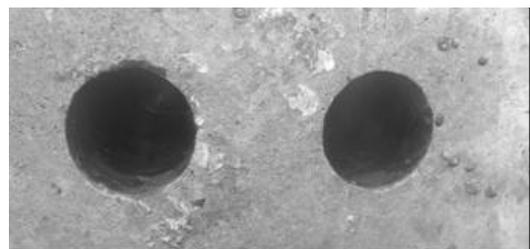


図-3.44 被覆コンクリート中性化深度の比較



海側



陸側

写真-3.6 中性化試験における変色の様子 (写真-B.10 参照)

b-4) 塩化物イオンの浸透

材令6年および材令21年におけるコンクリート中の全塩化物イオン量を測定した。その結果を図-3.45に示す。海側と陸側で明確な差異は認められなかった。

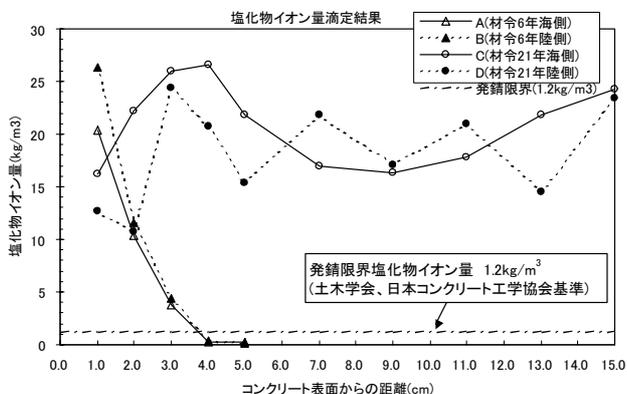


図-3.45 被覆コンクリート中の塩化物イオン量

土木学会および日本コンクリート工学協会では、発錆限界塩化物イオン量として 1.2kg/m^3 を採用しており^{19, 20)}、一般にこの値が用いられている。材令6年のもの(A, B)は、コンクリート表面から3.0cmまでの範囲で、土木学会等で示されている発錆限界塩化物イオン量 (1.2kg/m^3) を超えており、3.0cmより奥側では塩化物含有量は低い値を示したが、材令21年のもの(C, D)では、表面から鋼管に接する最奥まで塩化物含有量は発錆限界塩化物イオン量を大きく越える高い値を示した。

これを、フィックの第2法則として知られる拡散方程式に基づく「塩化物イオン拡散予測プログラム」を使用して将来予測をすると、内部鉄筋のある表面から8cmの位置で発錆限界値を超えるのは、Aで約29.7年後(拡散係数 $7.11 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$)、Bで20.3年後(拡散係数 $6.13 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$)となった。C, Dについては、既に発錆限界値を越えており、予測は行なわなかった²¹⁾。



写真-3.7 内部鉄筋の状態 (写真-B.11 参照)

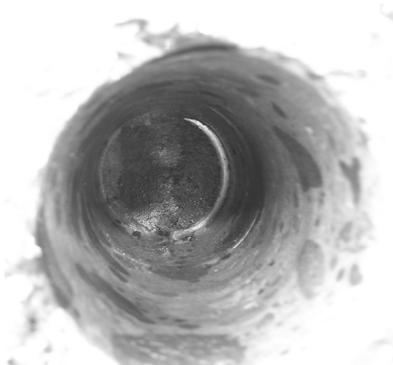


写真-3.8 コア内部杭表面の状態 (写真-B.12 参照)



写真-3.9 コアの杭側表面の状態 (写真-B.13 参照)

C, D の塩化物イオン量の値が極めて高いのは、コンクリートの打設方法が型枠上部からの自由落下によるものであり、打設時に海水を巻き込み、施工当初より塩化物イオン量の多いコンクリートになっていたものと推察される。

しかし、海水中で100cmの自由落下により打設した水中不分離性コンクリートの塩分含有量は最大でも 2.0kg/m^3 であったとの文献²²⁾もあり、本試験のC, Dの結果(約 20kg/m^3)との差が大きいため、海水の巻き込みだけでこの結果を説明することは難しく、今後更なる研究を進める必要がある。

C, Dのコアサンプルの採取時に鉄筋を切断しているため、この鉄筋の発錆状況およびコアを抜いた後の鋼管杭の表面状態、採取したコアの鋼管杭に接する表面を観察したが、いずれも発錆は認められなかった。写真-3.7~3.9に内部の状態を示す。

腐食反応は、塩化物イオン量だけでなく、酸素の供給量や水分の存在等の要素が複雑に作用して進行するものであり、今回コアを採取した干満帯という環境下では、水中に没する時間が長く、酸素の供給が不十分であったことがうかがえる。

福手らにより²³⁾、少なくとも干満帯ではコンクリートの練りませ水に海水を使用しても、水道水を使用した場合に比して内部鉄筋の腐食に及ぼす影響が大きいということはない、という報告もなされている。

以上のことから、干満帯においては、コンクリート中の塩化物イオン量が発生限界とされている 1.2kg/m^3 を越えていても内部鉄筋等の腐食に及ぼす影響は小さいと考えられる。

b-5) 鋼材表面の素地の観察結果

5年、14年、21年経過時点において鋼材表面素地の観察を実施した。鋼材および鉄筋には腐食は見られず、良好な防食状態であった。

b-6) まとめ

打設後6年および21年経過したコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を測定したが、初期値が不明なため経年変化の状況を確認することはできなかった。しかしながら慎重に施工、養生を行なった水中不分離性コンクリートについては、配合強度を超える圧縮強度を6年経過時点で保持していることが明らかとなった。

中性化の進行については、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。干満帯においては大気中の炭酸ガスに暴露される時間が限られることから、この部分は中性化の進行が大気中に比べて遅くなると考えられる。

また干満帯においては、良好な施工がなされた水中不分離性コンクリートであれば、鉄筋のかぶり厚8cmの位置で、塩化物イオン量の発錆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。しかし水中不分離性コンクリートであっても、水中自由落下高を極端に大きくさせると、海水を巻き込み、塩化物イオンの多いコンクリートとなる恐れがある。ただし、干満帯では、コンクリート中の塩化物イオン量が発錆限界とされる 1.2kg/m^3 を越えても内部鋼材の腐食に及ぼす影響は小さいと考えられる。

コンクリートは施工方法、養生方法によりその品質が大きく変化し、特に海水中という特殊環境で施工されるコンクリートは、一般のコンクリートと比較して厳しい環境に置かれるため、その施工に当たっては十分な検討と、より慎重な施工が求められる。

(3) ペトラタムライニング工法

ペトラタムライニング工法では、a) チタンカバー工法、b) ポリエチレン樹脂カバー工法、c) FRP樹脂カバー工法について述べる。外観観察は基本的に毎年実施しており、その結果を表-A.5に示す。これ以外の結果等については、それぞれの工法別に述べる。

a) チタンカバー工法

a-1) 外観観察結果

表-A.5に示したように、チタンカバーに変形、亀裂、破損などの異状は見られず、カバー表面の状態は良好であった。またボルトの緩み、変形なども認められなかった。

a-2) チタンカバー溶接部の観察結果

チタンカバー(厚さ0.7mm)はフランジ方式で取り付けられており、チタンカバーとフランジ部はTIG方式(タングステンナードガスアーク溶接)により隅肉溶接されている。チタンカバーの断面図を図-3.46に示す。フランジ溶

接部であるA部、B部より試験片を切り取り、溶接部の観察を行った。

溶接部の表面に汚れは認められたが、形状は滑らかで、変形および腐食による変色等は見られなかった。溶接部の形状をさらに詳細に調べるため、顕微鏡を用いて観察した。図-3.46のA部の断面写真を写真-3.10に、B部を写真-3.11に示す。A部、B部ともに溶接部の形状は滑らかであり、溶接の異状は認められなかった。

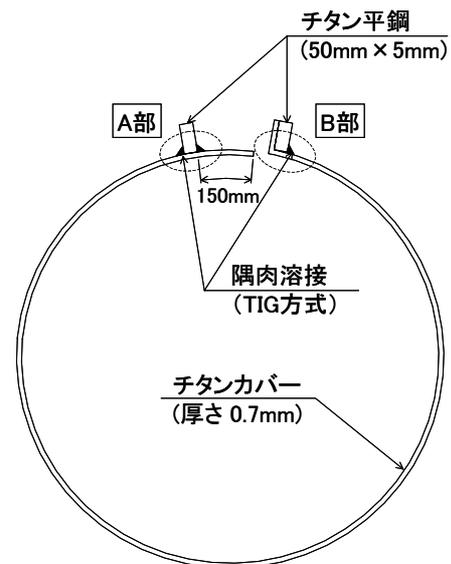


図-3.46 チタンカバーの断面図

a-3) チタンカバー表面変色の分析結果

チタンカバーとコンクリート上部工の境界から、写真-3.12に示すような汚れが見られた。汚れは鉄の錆色であり、その周辺では汚れの程度が小さく、虹色に変色している。この汚れの成分を明らかにするため、錆色部と周辺部の2カ所をEPMAで定性分析を行った。

錆色部では、図-3.47に見られるようにチタンの他に鉄が検出された。一方、周辺部では図-3.48のように、チタンのピークは錆色部と同等であるが、鉄のピークは錆色部に比べて小さいものとなった。したがって汚れの中には鉄が多く含まれているものと考えられる。以上の結果より、チタンカバー表面の汚れは、チタンそのものの腐食ではなく、仮設金物跡などの鋼材の腐食による流れ錆と推測される。

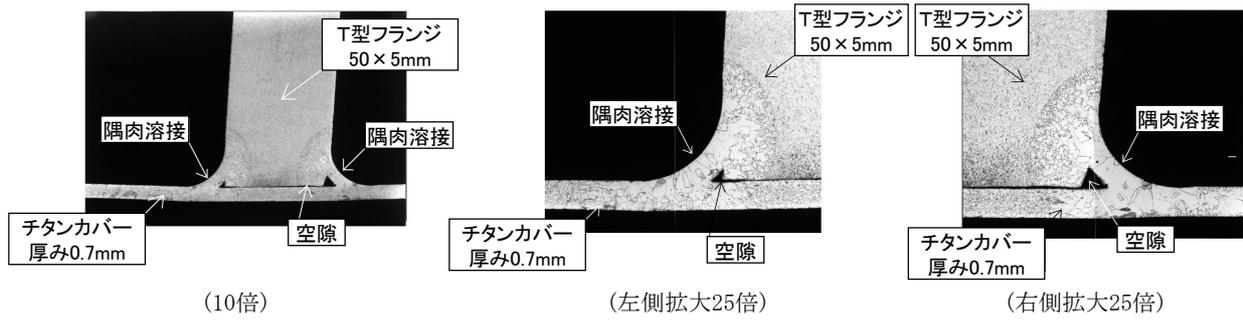


写真-3.10 チタンカバーとT型フランジを隅肉溶接した部分の断面写真

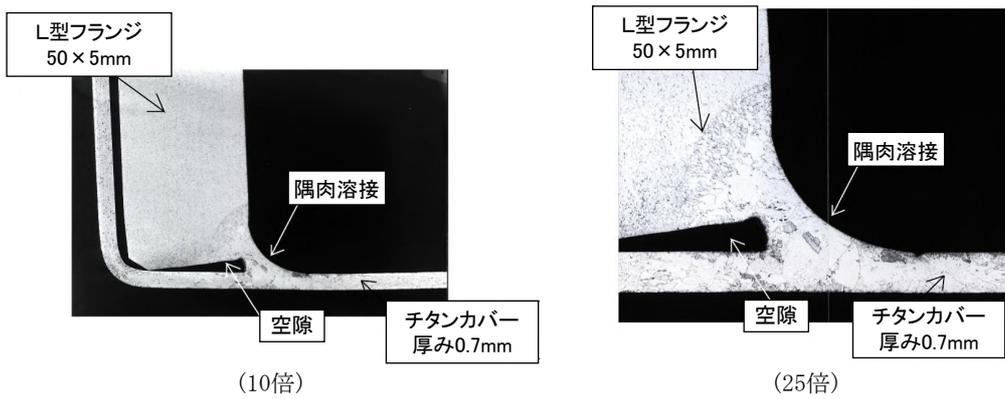


写真-3.11 曲げ加工したチタンカバーとチタンL型フランジを隅肉溶接した部分の断面写真

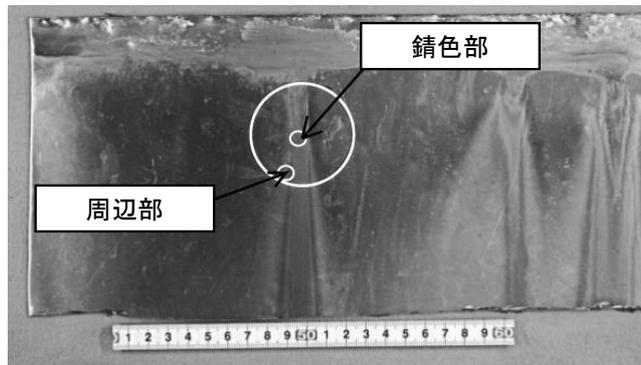


写真-3.12 チタンカバー表面の汚れの様子 (写真-B.14 参照)

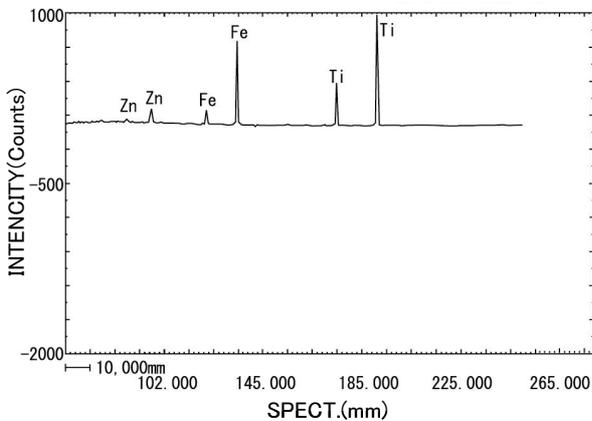


図-3.47 錆色部の元素の定性分析

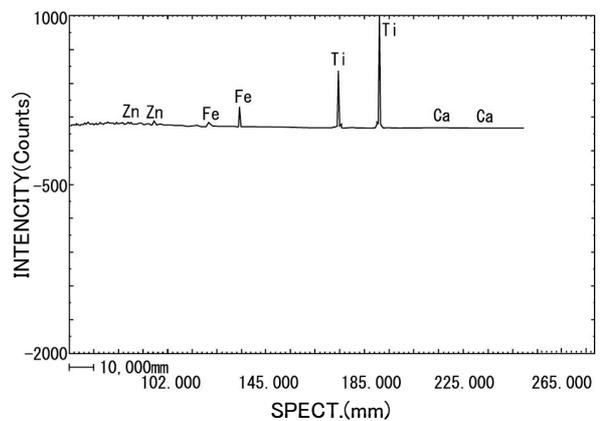


図-3.48 周辺部の元素の定性分析

a-4) チタンカバーの強度

試験片の切り取り位置を図-3.49に示す。南側の位置から、圧延方向に3枚、圧延とは直角の方向に3枚の試験片を切り出した。なおチタンカバーに使用したチタンはJIS規格(JIS H 4600 チタン板及び条)の一種材である。チタン材の引張強度の規格値を表-3.22に、試験片の引張試験結果を表-3.23に示す。全ての試験片において、引張力、0.2%耐力および破断伸び率の規格値を満たしており、20年間の暴露後も、チタンカバーは初期の強度性能を維持しているといえる。

a-5) まとめ

一般的には溶接部に腐食等の異状が発生しやすいが、本防食工法におけるチタンカバーの溶接部には、腐食や変形などは認められなかった。また引張試験においても、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、強度性能は維持されていた。

チタンカバー表面に変色が見られたが、EPMAによる元素分析の結果、この変色は仮設金物などの鋼材の腐食による流れ錆であると考えられ、チタンカバー本体や鋼管杭の腐食が原因ではないといえる。

b) ポリエチレン樹脂カバー工法

b-1) 外観観察結果

表-A.5に示したように、外観観察の結果は良好であり、カバーの破損等は認められなかった。またカバーの装着状態にも異状はなかった。

b-2) ペトラタム防食層および鋼材表面素地の観察結果

10年経過後と18年経過後にペトラタム防食層および鋼材表面素地の観察を実施した。10年経過後、防食層はペトラタム特有の粘性が保たれており、劣化は認められなかった。18年経過後については、飛沫帯から海上大気中ではほとんど変化がなかったが、干満帯以下では、部分的にペトラタム防食層の黒色化が見受けられた。

鋼材表面素地については10年経過後と18年経過後のいずれも、発錆等は認められず、安定した防食状態が維持されていた。18年経過後の観察でペトラタム防食層が部分的に黒色化していた部分について、鋼材の表面を観察したが腐食は発生していなかった。

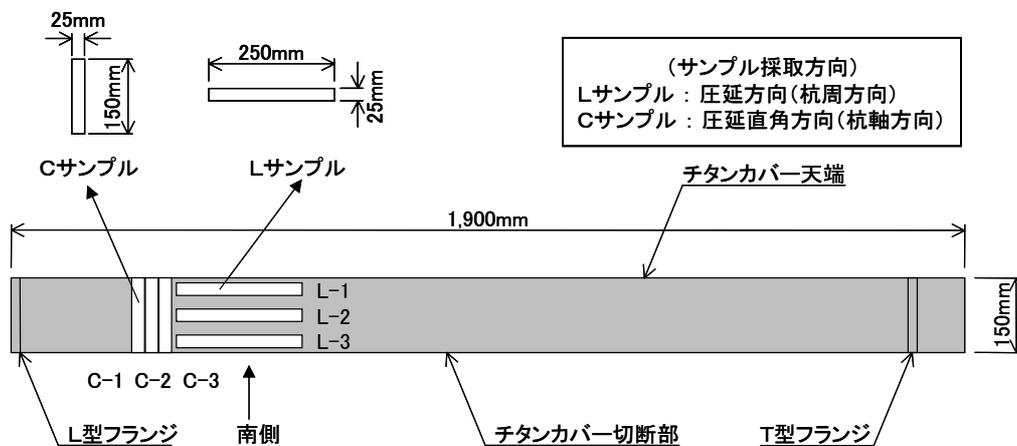


図-3.49 引張試験用の試験片の切り取り位置

表-3.22 チタン材の引張強度の規格値

JIS 規格 第1種	引張力 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	破断伸び率 (%)
	270-410	≥165	≥27

(JIS Z 2241 金属材料引張試験方法)

表-3.23 チタンカバー工法の引張試験結果

試験片 No.	引張力 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	破断伸び率 (%)
C-1	355.0	291.4	53.6
C-2	336.1	289.2	45.8
C-3	336.1	280.2	44.0
L-1	320.9	195.5	49.0
L-2	326.0	226.0	47.4
L-3	327.8	210.1	47.0

b-3) ポリエチレン樹脂カバーの強度

18年経過後において、ポリエチレン樹脂カバーの引張強度と曲げ強度を測定した。測定結果を表-3.24 および表-3.25 に示す。引張強度はいずれの部位でも 17 N/mm² 程度の値を有しており、規格値 (12.5 N/mm²) を満たしている。曲げ強度は 14~16 N/mm² であり、規格値 (19.6 N/mm²) よりも若干低下していた。

b-4) ペโตรラタム層の油分残存

ペโตรラタムライニング工法では、保護カバーにより密閉状態が保たれていれば、防食層内の油分が消耗することはほとんど無い。ペโตรラタムライニング工法は既設構造物に適用される場合が多く、腐食によって鋼材表面は平滑ではないので、密閉状態にすることは難しい。したがってペーストの塗布とペโตรラタムテープの入念な巻き付けで水分の浸入を防いでいるが、長期間の暴露では、浸入する水分により僅かながら油分が消耗していく可能性がある。

18年経過時点の油分の残存率を表-3.26 に示す。試験結果によれば、海上大気中が 95.6~96.7%、干満帯付近が 91.9~92.9%、海水中付近では 86.4~88.1% であり、干満帯以上の部位に比べて海水中付近の油分残存率は小さくなっていた。

b-5) 鋼管杭の肉厚

18年経過時点の鋼管杭の肉厚測定結果を表-3.27 に示す。初期肉厚を測定していないので、肉厚の減少を定量的に表わすことはできない。しかしながら鋼管杭の設計肉厚は 12mm であり、JIS A5525 により -0.7mm までの許容差が認められている。すなわち下限値は 11.3mm まで許容される。表-3.27 より、いずれの部位においてもこの許容値以上の肉厚を有している。b-2) で述べた鋼材表面素地の観察の結果および肉厚測定結果から判断すると、良好な防食状態を維持していると考えられる。

b-6) まとめ

外観観察の結果、劣化・損傷等は認められず、カバーの装着状態にも異状はなかった。鋼材表面の素地の観察は、10年経過時と18年経過時に行ったが、いずれも発錆は認められず、良好な防食状態が維持されていた。

ペโตรラタムテープの油分残存率試験の結果、海水中付近で干満帯や海上大気中と比べて油分が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に近い値であり、十分な防食効果が得られているといえる。

表-3.24 ポリエチレン樹脂カバーの引張強度

測定方向	引張強度 (N/mm ²)			
	規格値	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	12.5	17	18	17
海側		17	17	16

表-3.25 ポリエチレン樹脂カバーの曲げ強度

測定方向	曲げ強度 (N/mm ²)			
	規格値	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	19.6	14	15	16
海側		14	14	14

表-3.26 ポリエチレン樹脂カバー工法の油分の残存率

測定方向	油分残存率 (%)		
	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	96.7	92.9	88.1
海側	95.6	91.9	86.4

表-3.27 ポリエチレン樹脂カバー工法の鋼管杭の肉厚測定結果

測定方向	鋼管杭の肉厚 (mm)		
	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	12.07	11.90	11.71
海側	11.93	11.80	11.74

c) FRP 樹脂カバー工法

c-1) 外観観察結果

表-A.5 に示したように、FRP 樹脂カバーの海上大気中から飛沫帯にかけては、ふくれや割れ等の発生は見られず、健全な状態を維持していた。干満帯については下端部にイガイ、フジツボを中心とした海生生物の付着が認められたが、ふくれや割れ等の発生は認められず、健全な状態を維持していた。

c-2) ペโตรラタム防食層および鋼材表面素地の観察結果

10年経過時と18年経過時にペโตรラタム防食層および鋼材表面素地の観察を実施した。

10年経過時、防食層はペโตรラタム特有の粘性が保たれており、劣化は認められなかった。18年経過時については、

部分的にペトロラタム防食層の黒色化が見受けられたが、その下では茶褐色を維持しており、外観上は明らかな油分の消耗は見受けられなかった。

鋼材表面の素地については10年経過時と18年経過時のいずれも、発錆等は認められず施工当初の表面状態が維持されており、安定した防食状態に保たれていた。

c-3) FRP 樹脂カバーの強度

18年経過時におけるFRP樹脂カバーの引張強度と曲げ強度を表-3.28と表-3.29に示す。曲げ強度は規格値(製品出荷時の最小品質管理値)と同等以上であったが、引張強度は規格値を下回っていた。特に干満帯での低下が大きかった。干満帯は波の衝撃を受ける部位であり、繰り返し応力がかかったために、他の部位よりも引張強度が低下したものと考えられる。

FRP樹脂カバーの強度については、沖縄県中城湾港において、10年間の鋼矢板の防食試験が実施され、本試験と同様にFRP樹脂カバーによるペトロラタム工法の耐久性が試験されている²⁴⁾。これによると、10年後のFRP樹脂カバーの引張強度は69 N/mm²、曲げ強度は103 N/mm²であると報告されている。この値と比較しても、本試験におけるFRP樹脂カバーの引張強度は低下しているといえる。本試験環境のように波浪があり、波の衝撃を繰り返し受ける干満帯では、FRP樹脂カバーの強度が経年的に低下することに留意する必要がある。

c-4) ペトロラタム層の油分残存

b-4)のポリエチレン樹脂カバー工法の項でも述べたが、長期間の暴露では、保護カバーのフランジ接合部およびカバー下端部から浸入する水分により、僅かながらペトロラタム防食層の油分が消耗していく可能性がある。18年経過時点の油分の残存率を表-3.30に示す。試験結果によれば、海上大気中が91.2~93.2%、干満帯付近が92.5~94.9%、海水中付近では85.9~92.1%であり、ポリエチレン樹脂カバー工法の結果と同様の傾向を示している。

c-5) 試験片による防食効果の確認

試験片は海上大気中と干満帯に設置したが、いずれも部分的に微かな黒色化は生じていたものの腐食は認められなかった。表-3.31に試験片の腐食速度を示す。海上大気中の試験片は 4.3×10^{-5} mm/y、干満帯では 2.7×10^{-5} mm/yであった。いずれもほとんど腐食していない。

また別途測定した無防食時の腐食速度をもとに防食率を算出した結果を表-3.31に示す。防食率は両者ともほぼ100%である。c-2)で述べた鋼材表面の素地の観察結果と併

せて判断すると、本工法は高い防食機能を有するものと考えられる。

c-6) まとめ

外観観察では、劣化・損傷等は認められず、カバーの装着状態にも異状はなかった。10年経過時と18年経過時に鋼材表面素地を観察したが、腐食は発生しておらず、また試験片による防食試験でも、防食率が100%という結果を得た。

しかし防食層であるペトロラタムテープの油分は18年間で最大15%低下し、またカバー材の引張強度も最大30%低下した。このように18年の間、鋼管杭は良好な防食状態を維持していても、防食層やカバー材は経年劣化していくことも考えられる。どの程度まで劣化が進行すると腐食が起り始めるかについては、今後検討する必要がある。

表-3.28 FRP樹脂カバーの引張強度

測定方向	引張強度 (N/mm ²)			
	規格値	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	78	67	54	66
海側		70	55	68

表-3.29 FRP樹脂カバーの曲げ強度

測定方向	曲げ強度 (N/mm ²)			
	規格値	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	98	144	102	124
海側		150	112	157

表-3.30 FRP樹脂カバー工法の油分の残存率

測定方向	油分残存率 (%)		
	海上大気中 +3.5~ +5.0m	干満帯 +1.5~ +2.0m	海水中 0~ +0.5m
陸側	91.2	92.5	92.1
海側	93.2	94.9	85.9

表-3.31 FRP樹脂カバー工法の試験片による評価結果

海上大気中 +3.5~+5.0m		干満帯 +1.5~+2.0m	
腐食速度 (mm/y)	防食率 (%)	腐食速度 (mm/y)	防食率 (%)
4.3×10^{-5}	100	2.7×10^{-5}	100

注1 防食率=(無防食時の腐食速度-防食試片の腐食速度)/無防食時の腐食速度×100

注2 無防食時の腐食速度は、海上大気中:0.25mm/y、干満帯:0.15mm/y

3.5 試験開始から10年未満の防食工法

(1) ダクトルカバーモルタルライニング工法

a) 工法の概要

ダクトルカバーモルタルライニング工法は、土木用埋設型枠として2002年に開発された高耐久性型枠を、港湾鋼構造物の防食対策として適用したものである。高耐久性型枠をカバーとして使用し、高耐久性型枠と鋼管杭の間にセメント系モルタルを注入する。高耐久性型枠(以下、ダクトルカバー)は遮塩性、耐磨耗性・耐衝撃性に優れており、また高強度を有していることから部材の薄肉化が可能となり、現在までに様々な土木構造物に使用されている。

防食層はセメント系モルタルであり、セメント自身が持つ強いアルカリ性により、鋼材表面に緻密な不動態被覆が形成され、鋼材を防食する。またダクトルカバーが外部からの塩化物イオンの侵入を最小限にとどめ、かつ砂礫の衝突による損傷から保護することにより、長期にわたり不動態被覆を保持することができる。

b) 試験実施概要

表-C.3に示すように、2003年に鋼管杭No.2において同工法を適用した。図-3.50にダクトルカバーモルタルライニング工法の断面概略図を示す。ダクトルカバーの標準厚みは20mmであり、継手部はSUSボルトを使用し、継手部が損傷ないようにセメント系無収縮モルタルを充填している。

ダクトルカバーには、靱性の向上を目的として繊維が混入されている。混入する繊維は2種類あり、鋼繊維を用いたもの(ダクトル-FM)と有機繊維を用いたもの(ダクトル-F0)の2種類がある。図-3.51に示すようにダクトル-FMカバーとダクトル-F0カバーを組み合わせて鋼管杭に設置し、繊維の違いによる防食効果を確認している。

試験項目は、外観観察、磨耗量測定、塩化物イオン浸透試験である。磨耗量を求めるために、本試験では図-3.51に示す所定位置において、ダクトルカバーの弧周および継手部の厚さを、ノギスおよび巻尺を用いて測定した。

またダクトル-FMカバー、ダクトル-F0カバー上段下部(海側)からコンクリートカッターにより1供試体を採取し、EPMA(電子線マイクロアナライザー)によって面分析を行い、塩化物イオン濃度を測定した。

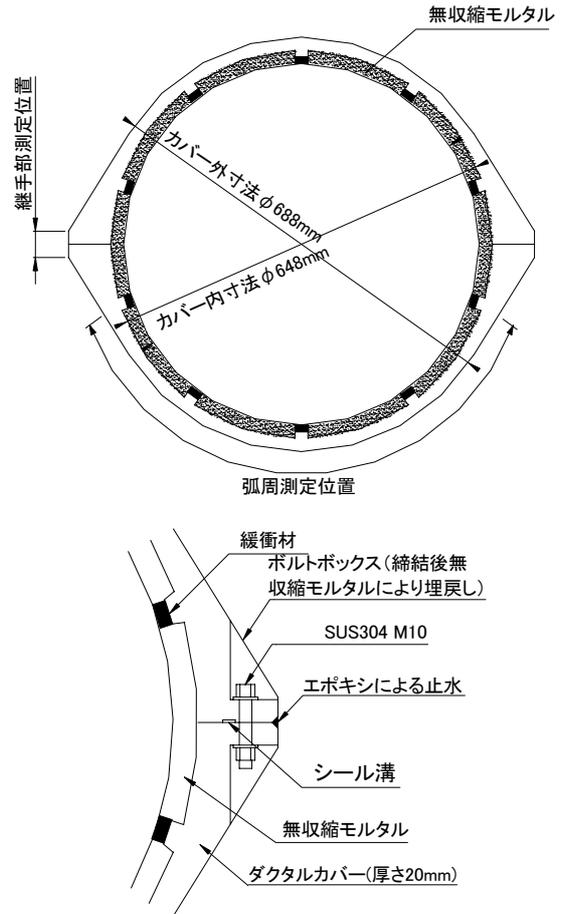


図-3.50 ダクトルカバーモルタルライニング工法概略図

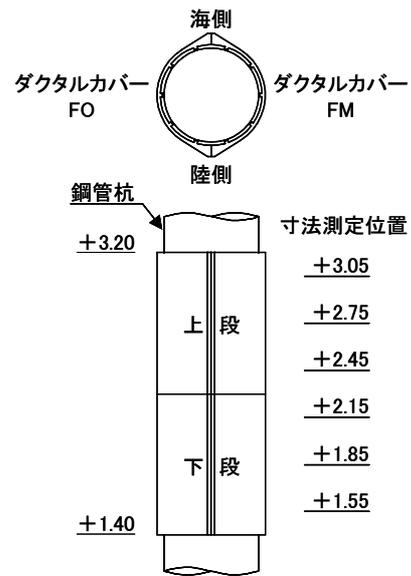


図-3.51 磨耗量測定位置

c) 試験結果

2003年に設置した後、1年経過時の試験結果を以下に述べる。

c-1) 外観観察結果

<ダクトアル-FMカバー>

目視による観察の結果、ひび割れ、破損等、防食機能に影響を与えるような損傷は確認されなかった。また、カバー成型時に表面に現れていた鋼繊維は、点錆あるいは線錆として確認できるものの、錆は充填したモルタルの内部までには達していなかった。

<ダクトアル-F0カバー>

写真-3.13に示すように、上段上部に最大幅0.2mm、長さ50mm程度のひび割れが数カ所発生していることが確認された。ダクトアルカバー端部より一定間隔で発生していることから、引張力がダクトアル-FMカバーに比べ、ダクトアル-F0カバーは小さいため、気温による体積変化にカバーが追従できなかったことに起因することが推察される。なお、ひび割れはエポキシ樹脂により補修を行った。

その他の部位では損傷は認められなかった。

c-2) カバーの磨耗量

表-3.32に磨耗量の測定結果を示す。ダクトアルカバーの弧周と継手部の厚さは、ほとんど変化していない。角欠け等、破損している様子も認められなかった。

c-3) 塩化物イオンの浸透深さ

EPMA面分析の結果、塩化物イオンの浸透深さは、ダクトアル-FMカバーで0.5~0.6mm、ダクトアル-F0カバーで1.3mm程度であった。初期(約1年)の結果から塩化物イオンの

拡散係数を推定することは難しいので、今後継続的に測定した上で拡散係数を求めたい。



写真-3.13 ダクトアルカバーの外観状況
(手前：F0 奥：FM)
(写真-B.15参照)

(2) 特殊ウレタン樹脂新被覆工法

(保護カバー：FRPカバーの無フランジタイプ)

a) 工法の概要

表-C.35に示すように、本工法の構成は、防食層が特殊ウレタン樹脂、カバー材がFRPである。FRPカバー内面に特殊ウレタン樹脂を塗布し、鋼管杭に貼り付け、無フランジのFRPカバーで固定する。特殊ウレタン樹脂は弾性に優れ、湿潤面においても良好な接着性を有し、腐食因子である水、酸素、塩化物イオンを環境から遮断して鋼材表面を保護する。また、カバーの接合部を無フランジとすることで通常の工法のような継手部が無くなり、波の衝撃を受けにくいという特徴を持っている。

2000年8月に鋼管杭No.21の下段に本工法を適用し、試験を開始した。さらに2004年に上段にも適用した。

表-3.32 ダクトアルカバーの磨耗量測定結果

測定箇所	カバー種類	弧周 (mm)		継手厚 (mm)		
		測定：2003.4.17 (初期値)	測定：2004.7.28 (1年3ヵ月後)	測定：2003.4.17 (初期値)	測定：2004.7.28 (1年3ヵ月後)	
上段	+3.05	FM	934	935	40.6	40.5
		F0	935	935	40.7	40.7
	+2.75	FM	934	934	41.1	41.6
		F0	935	935	40.1	40.3
+2.45	FM	934	935	40.5	40.3	
	F0	935	935	40.9	41.1	
下段	+2.15	FM	933	933	41.5	40.6
		F0	932	932	40.6	40.6
	+1.85	FM	934	933	41.2	40.7
		F0	933	935	40.6	39.8
	+1.55	FM	933	934	41.2	40.3
		F0	933	933	40.6	40.2

注) FM：鋼繊維 F0：有機繊維

b) 試験実施概要

試験は、毎年夏季に外観観察を実施した。また、防食性を確認するため、防食層を一部除去して鋼材表面の素地を観察した。下段は、1年経過時（2001年）と5年経過時（2005年）、上段は1年経過時（2005年）に実施した。

c) 試験結果

c-1) 外観観察結果

FRPカバーの一部に剥離が生じたが、防食層に異状はなかった。その他の部位に変化は認められず、全体的に健全な状態を保持していた。

c-2) 鋼材表面素地の観察結果

2000年に適用した下段では、1年経過時と5年経過時に、2004年に適用した上段では1年経過時に、鋼材表面の素地の観察を行った。いずれの場合も鋼材の腐食は認められず、鋼材表面は良好な防食状態であった。

(3) 耐海水性ステンレス鋼カバー工法

(ペトロラタムライニング)

a) 工法の概要

表-C.7に示すように、耐海水性ステンレス鋼カバー工法は、ペトロラタム防食材の表面を耐食性に優れた耐海水性ステンレス鋼製の保護カバーで覆う防食方法であり、高強度であるため、波浪や漂流物の衝突による破損が起きにくいという特徴がある。

工法の構造断面を図-3.52に示す。ステンレスカバーは周方向に二分割されており、フランジ部をチタン製ボルトで固定する構造となっている。本工法を鋼管杭 No.5 に適用し、試験を開始した。

b) 耐海水性ステンレス鋼

海洋環境下では高濃度の塩分が存在するため、一般のステンレス鋼では、孔食、すきま腐食などの局部腐食が生じ、耐食性に問題があった。本試験に用いた耐海水性ステンレス鋼は、耐食性を飛躍的に向上させた、いわゆるスーパーステンレス鋼である。耐食性を示す指標は、一般にCr, Mo,

およびNの含有量から算出する孔食指数(Pitting Resistance Equivalent : $PRE = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 30 \times \%N$)で代表され、この指数が大きくなるにしたがって孔食は発生し難くなる。Nの係数は各研究機関によって異なる値(10~30)を取るが、いずれも孔食指数(PRE) > 40が耐海水性ステンレス鋼の指標となっている。表-3.33に各種ステンレス鋼の代表的な化学組成と孔食指数(PRE)を示す。試験に使用した耐海水性ステンレス鋼の成分は、(23Cr-25Ni-5.5Mo-0.2N)と、(20Cr-18Ni-6Mo-0.8Cu-0.2N)である。

c) 試験実施概要および結果

暴露期間が短いため、2年経過時に外観観察のみを実施した。飛沫帯では、耐海水性ステンレス鋼2種(UNS No. S32053(SUS836L), UNS No. S31254(SUS312L))ともに発錆は無く、孔食など局部腐食の発生も認められなかった。

干満帯では、海生生物の付着状況および海生生物剥離後の表面性状を観察したが、2鋼種ともに海生生物付着下におけるすきま腐食の発生は認められなかった。また海中でも、干満帯と同様に腐食の発生は認められなかった。

以上の結果から、施工から2年経過時の外観観察では、耐海水性ステンレス鋼カバーの表面に異状は認められず、良好な状態を維持していた。

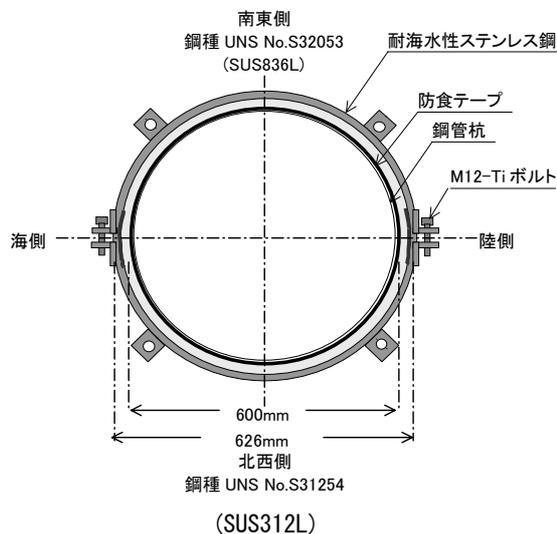


図-3.52 ステンレスカバー工法の断面図

表-3.33 各種ステンレス鋼の代表組成(mass%)と孔食指数

区分	JIS	UNS No.	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N	PRE (**)
汎用 ステンレス鋼	SUS 316L	S31603	0.020	0.54	0.83	12.15	17.50	2.20	—	—	24.8
	SUS 329J4L	S32506	0.014	0.22	0.70	6.55	24.60	3.22		0.17	38.6
耐海水性ステ ンレス鋼*)	SUS 312L	S31254	0.009	0.38	0.31	17.73	20.01	6.07	0.78	0.20	44.0
	SUS 836L	S32053	0.006	0.10	0.20	24.19	23.00	5.54	—	0.20	45.3

*) 試験で使用した2種の耐海水性ステンレス鋼 **) $PRE(Pitting\ Resistance\ Equivalent) = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 20 \times \%N$

(4)耐食アルミカバー工法 (ペトロラタムライニング)

a)工法の概要

表-C.34 に示すように、耐食アルミカバー工法は、ペトロラタム防食材の表面を耐食アルミ合金カバーで覆う防食工法である。耐食アルミ合金の材質は 5052 合金、厚みは 1.5mm、表面にはアクリル樹脂焼付け塗装 (40 μ m以上) が施されている。

b)試験実施概要

試験対象は鋼管杭 No. 20 である。外観観察と試験片(耐食性アルミニウム 5052)による暴露試験を実施した。外観観察は、耐食アルミカバーやボルト・ナットについて観察した。

試験片による暴露試験では、深度+1.25m~+4.75mの位置に、表面積が 100cm²の試験片を取り付け、質量減少量から腐食速度を求めた。なお、試験片の取付け方向は、陸側でカバーフランジにボルトで挟み込むように固定した。

c)試験結果

c-1)外観観察結果

4 年経過時において、耐食アルミカバーの表面塗装にすり傷が数カ所認められた。

c-2)試験片による暴露試験結果

結果を表-3.34 および図-3.53 に示す。取付深度+1.25mでの 2 年間暴露した試験片の腐食速度が大きいのは、ボルト穴の周囲だけが腐食していることから、すきま腐食またはボルトナットの絶縁不良による異種金属接触腐食が生じたためと考えられる。飛沫帯である取付深度+1.83m と+3.90m の試験片には、全体に孔食が認められた。また、取付深度+2.50m 以上の試験片にも僅に孔食が認められた。

なお、取付深度+4.79mの暴露期間 4 年間の試験片は、脱落していたため回収出来なかった。

以上より、試験開始後 4 年経過時では、耐食アルミカバーの異状は確認されなかった。試験片による暴露試験では、飛沫帯での試験片全体に孔食が確認された。

表-3.34 耐食性アルミニウム試験片の腐食速度

試験片 No.	取付深度 (m)	腐食減量 (g)	暴露期間 (y)	腐食速度 (mm/y)
1	+4.79	-	4	-
2	+4.79	0.1825	2	0.0017
3	+3.90	0.1974	4	0.0009
4	+3.90	0.0761	2	0.0007
5	+3.08	0.0896	4	0.0004
6	+3.08	0.0611	2	0.0006
7	+2.50	0.1127	4	0.0005
8	+2.50	0.0680	2	0.0006
9	+1.83	0.5963	4	0.0028
10	+1.83	0.1468	2	0.0014
11	+1.25	0.1389	4	0.0007
12	+1.25	1.7101	2	0.0162

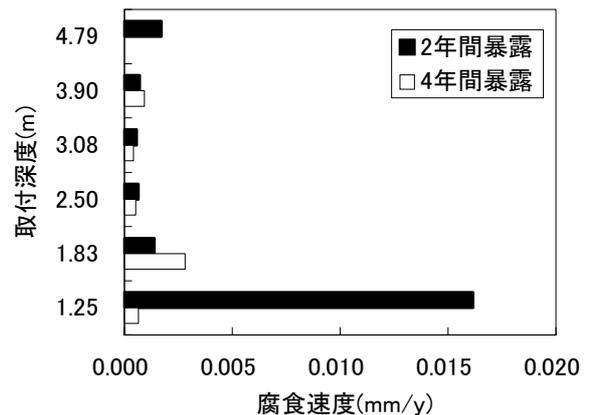


図-3.53 試験片取付位置と腐食速度の関係

3.6 試験結果と考察のまとめ

以上の試験結果と考察をまとめると、以下ようになる。

(1) 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、 $-800 \sim -900\text{mV}$ 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。

(2) 被覆防食工法

a) 塗装・有機ライニング工法

a-1) 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。

a-2) ポリエチレンライニング工法

- ・ 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。

a-3) 水中硬化型ライニング工法

- ・ 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。

a-4) 極厚マスチック防食工法

- ・ 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。

b) 無機ライニング工法

b-1) 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-2) CRUS 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発錆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。

c) ペトラタムライニング工法

c-1) 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。

c-2) 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-3) 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。

4. 試験結果を反映した新たな技術提案

約 20 年間の暴露試験結果に基づき、電気防食工法と被覆防食工法に分けて、技術的な提案を述べる。

4.1 電気防食工法

電気防食工法では、①鋼管杭の電位と陽極の発生電流の長期的な推移、②干満帯への防食効果、③適正な鋼管杭電位の把握(定電位法による試験)、④サンドエロージョンに対する防食効果について検討した。これらの結果をもとに、維持管理手法や電気防食の設計に関する考え方について述べる。

(1) 電位測定による維持管理

電気防食の維持管理は、電位測定に委ねられている。電位を測定する場合、現状では、測定者が基準電極を防食対象物に沿って海水中に吊り下げ、例えば 1m 毎の深度で測定している。この測定は確実な測定手法であるが、時間と労力を要するため、測定時期は不規則とならざるを得ない。電位が年間を通して一定ではないことは、波崎における試験でも明らかになっており、また不測の事態に備えるためにも連続測定することが望ましい。そこで、長期間、電位を連続測定する方法について提案したい。

電位測定には、電位差計と基準電極が必要である。精度良く電位を測定するためには、高入力抵抗の機器を用いる必要がある。測定機器の進歩により、電位測定機能を有し、かつそのデータを一定期間蓄積できるデータロガーが市販されている。本棧橋における暴露試験では、1993 年から入力抵抗が 1M Ω 以上のデータロガーを用いて電位測定を実施している。その結果、従来の電位差計と比較しても劣ることのない精度で測定できることが確認された。

電位測定の基準電極には、海水銀塩化銀電極が使用されることが多いが、耐久性に優れているとはいえ、短期間あるいは一時的な測定を行う場合に用いられている。長期の測定に耐えうる電極について検討するために、本暴露試験では、構造が単純であるため衝撃等にも強い亜鉛基準電極を用いた測定を試みた。亜鉛基準電極の外観を写真-4.1 に示す。亜鉛基準電極の固有電位は、鋼材の電位を測定する際の基準になるため、一定でなくてはならない。長期の試験の結果、固有電位は $\pm 30\text{mV}$ の範囲で変動するものの、一般的に安定した値を示すことが明らかとなった。

以上の結果から、電位測定機能を有するデータロガーおよび、亜鉛基準電極を用いることにより、長期間、連続的に鋼材の電位を測定することが可能になった。亜鉛基準電極とデータロガーを用いた電位測定により、港湾施設の長期的な維持管理を従来よりも容易に行えると考えられる。

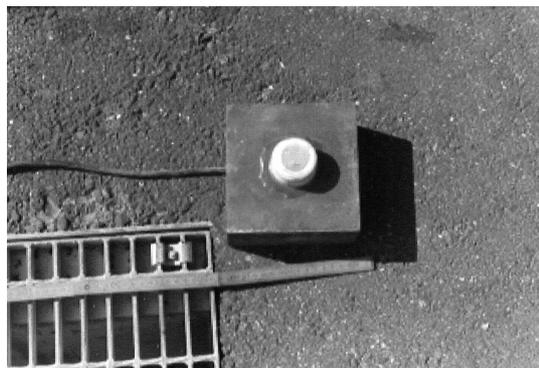


写真-4.1 亜鉛基準電極の外観 (写真-B.16 参照)

(2) 流電陽極の更新時期

流電陽極は時間の経過に伴い消耗する。陽極が完全に消耗してしまうと無防食の期間が生じ、鋼材の電位が防食電位よりも貴値になる。この時点で新たに陽極を取付けると、再び防食電位よりも卑値にするために多くの電流を要し、不経済である。完全に陽極が消耗する直前に、すなわち防食状態に保たれている間に更新すれば、電流の増加は生じず経済的であり、また無防食の期間も生じない。これを可能にするためには、以下に示す方法で陽極の消耗量を正確に把握する必要がある。

従来の陽極の消耗量調査には、潜水士が鋼材に取付けてある陽極の形状を測定し、残存質量を求める方法と、潜水士が陽極の取付金具を水中切断し、陽極を陸上に引き上げて残存質量を秤量する方法の二つがある。しかし、いずれの作業も大掛かりとなり、調査の費用も高額になる。最近、鋼材の電位から陽極消耗量を推定する方法が報告されているが²⁵⁾、確実な方法は陽極から発生する電流を実測することである。

図-4.1 のように、陽極と鋼材間の電流回路にシャント抵抗(0.01 Ω)を挿入し、シャント抵抗の両端の電圧降下から、陽極の発生電流を求めることができる。なおシャント抵抗は防水構造となっており、陽極と鋼材の間に絶縁材を挿入し、両者をシャント抵抗を介して電氣的に接続する。

図-4.1 に示す測定装置(シャント)を取付けておけば、必要に応じて容易に陽極の発生電流を把握することができる。また、データロガーを用いて測定値を収録しておけば、一定期間に流れた電流量がわかるので正確に陽極の消耗量を求めることができ、陽極寿命も予測することができる。今後、重要な施設には、代表的な陽極に本測定装置を設置し、総合的な維持管理を行うことが望ましい。

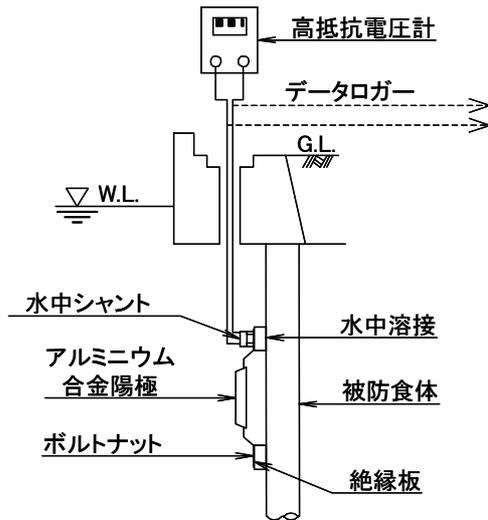


図-4.1 陽極の発生電流測定要領図

(3) 防食面積の算定

3.3(2)で述べたように、本試験施設が置かれているような波浪環境下では、潮位が低い時でも波浪により干満帯全域が没水するケースが多いので、干満帯にも陽極からの電流が流入することになる。現在の設計基準では、L. W. L. -1mまで被覆防食をすることになっているので、干満帯に陽極からの発生電流は流入しない。しかしこの基準以前に建設された鋼構造物や、干満帯が被覆防食されていない場合には、波浪の影響により干満帯にも電流が流入し、この部分も防食面積に含まれる。この点を考慮して、電気防食における防食対象面積を算出する必要がある。

次に、波浪環境下において、干満帯に電気防食を適用するか、あるいは被覆防食を適用するかについて考察する。電気防食とした場合、荒天期は、平穏期に比べて電流量が増加し、また鋼材の電位も大きく変動することが明らかになっている³⁾。陽極消耗の観点からは、電流量の増大は不経済であり、電位の変動も好ましくない。波浪環境下における干満帯には、電気防食と被覆防食のいずれも効果があるが、経済性等の面から、現在の設計基準のように被覆防食を選択するのが賢明と考えられる。

(4) 鋼材電位の設定

鋼材の電位(陰極電位)を防食電位(-780mV 海水銀塩化銀電極基準)よりも卑値にすれば、防食することができる。3.3(3)で述べたように、本試験では、-780mVよりもさらに卑な-900mVに設定すれば良いことが明らかになった。その理由は、鋼材の電位を-900mVに設定すれば、鋼材の表面に良質な石灰質被膜(エレクトロコーティング)が生成するため、陽極からの発生電流が短期間で低減し、かつ安定化するために陽極の寿命が延びるからである。陽極寿命を

考慮すると、最適な電位に設定する必要がある。試験の結果、-900mVが最適であることが明らかになったが、環境の条件などによって、これよりも卑値の方がさらに有利な場合も考えられるので、今後も検討していきたい。

(5) サンドエロージョンが生じる環境での防食電流密度

3.3(4)で述べたように、電気防食にはサンドエロージョンを防止する効果もあることが明らかになった。しかし通常の海水中の腐食よりも激しいサンドエロージョンを防止するには、それだけ大きな防食電流密度を必要とすることが考えられる。サンドエロージョンが生じる環境における防食電流密度は、港湾区域内における値よりも大きく設定する必要があると考えられる。

サンドエロージョンの他に、例えば激しい気泡などによっても同様の現象が生じることも考えられる。大型の船舶が着岸する岸壁では、スクリューからの気泡が激しく鋼材へ衝突するエロージョン・コロージョンが考えられる。この作用によってサンドエロージョンと同様の現象が生じることが考えられるので、激しい気泡をはじめとして、細かな粒子が鋼材に衝突するような環境に電気防食を適用する場合には、防食電流密度の設計値を通常よりも大きくする必要があるといえる。なお鋼材の腐食防食に及ぼす気泡などの影響については、今後の検討課題である。

4.2 被覆防食工法

3.4で取上げた防食工法は、塗装・有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペトロラタムライニング工法と多岐にわたっている。いずれの工法においても顕著な腐食の痕跡はなく、約20年の間、防食状態が維持されていた。今後も継続して維持されると思われるので、現時点では各工法の耐用年数を明記することは難しい。現状では、少なくとも20年間は防食機能を保持できるといえる。以下に、20年間の暴露試験の結果より、耐用年数を長期化するために留意すべき点等を述べる。

(1) 塗装・有機ライニング工法

a) 素地調整の重要性

3.4(1)d)で述べたように、極厚マスチック工法では、不十分な素地調整が原因と思われる付着力の低下現象が生じた。また過去には、塗装工法において、鋼材面の処理が不十分であったために、ブラケット取付部の跡が残り、この部分に点錆や塗膜の割れなどの異状が発生したとの報告もあった²⁶⁾。

素地調整の重要性については従来から指摘されていたが、本試験において、改めて被覆施工する前の鋼材表面の調整

が重要であることを認識させられた。不十分な素地調整を行った場合には、長期の耐久性は得られないので、適正な施工が重要である。

b) 外観上の劣化と腐食の関係

超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法や水中硬化型ライニング工法では、強い紫外線の影響でチョーキングが発生した。今後の経過観察が必要であるが、現時点ではこれが原因で直ちに腐食が発生するなどの問題は生じていない。つまり外観上の劣化と腐食を直接結びつけることはできないため、今後は両者の関係を明確にすることが必要である。

今回の事例とは反対に、外観上の劣化が直ちに腐食と直結する場合もあると考えられる。どのような劣化に注意すべきかを明らかにすることは、維持管理をする上で非常に重要であるが、これについて検討することは難しい面もある。劣化が生じてそのまま放置し、腐食の進行やその程度を見極めるような息の長い研究が必要である。

c) 非破壊検査による維持管理手法

被覆防食における維持管理は、主に外観観察に委ねられている。b)で述べたように、それだけでは十分でない面もあるので、被覆材の健全性評価を念頭に置き、本試験では絶縁抵抗の測定を試みた。これは非破壊で行えるので、将来的に実構造物に適用できる可能性の高い手法の一つである。

本試験では、いずれの工法においても防食機能が保持されており、 $10^8 \Omega \text{m}^2$ 程度の高抵抗の場合しか測定されなかった。したがってどの程度まで絶縁抵抗が低下すれば腐食が進行するようになるのか判断できなかった。

また塗膜が $10^8 \Omega \text{m}^2$ 以上の高抵抗になればなるほど、測定する際の漏洩電流により真の絶縁抵抗を測定することは困難になる。測定精度を向上させるために、測定面をボックスで覆い、シリカゲルや窒素ガスなどを封入するなどして環境から遮断する、いわゆる環境遮断法²⁰⁾による測定を現場に適用することも念頭におく必要がある。

本試験のみならず一般的に、被覆材の絶縁抵抗や付着力の試験は、被覆材が健全な部分で実施されてきた。これではデータの蓄積として不十分である。なぜなら被覆材に劣化が生じている部分でこれらの試験を実施し、劣化の程度と絶縁抵抗や付着力との関係を明らかにしていくことが、本来の試験のあり方である。このような試験の実施およびデータの蓄積が、将来の維持管理技術の向上に貢献することになる。

本試験においては、このまま定期的に絶縁抵抗を測定し、経過観察することはもちろんのこと、今後は人為的にピン

ホールなどの欠陥を作り、その部分の絶縁抵抗測定試験を実施することも検討する必要がある。絶縁抵抗と腐食の関係が明らかになれば、非破壊での健全性評価手法の確立の一助になり、維持管理技術が大幅に向上すると考える。

d) ポリエチレンライニング工法の補修方法

ポリエチレンライニングの損傷部分を補修する方法として超音波溶着法が開発されている²⁷⁾。超音波溶着法では、ポリエチレン等の熱可塑性プラスチックが加熱により軟化し、冷却すると固まることを利用して接着する。この方法は、①構造上一体成形が困難な場合、②色や材質の異なるものを一体とする場合、③金属銘板などを接着する場合などに用いる接着加工技術の一種である。

ポリエチレンライニングの補修には、損傷部分に水中硬化型エポキシ樹脂を充填する方法が用いられていた。しかしポリエチレンとエポキシ樹脂の接着が強固でないため、補修後も再び損傷が生じることがあった。超音波溶着法による補修では、**図-4.2**に示すように、損傷部に補修用ポリエチレンをあてがい、周囲を溶着する。ポリエチレン同士を溶着しているため、従来法に比べてより強固な接着力を得ることができる。**写真-4.2**に超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修状況を示す。本手法は、水中の補修にも適用でき、**写真-4.3**は水中補修後の補修部分を示す。

本栈橋では、2005年より超音波溶着法による補修を試み、現在、試験を継続中である。溶着した部分からの水分の浸透や、接着力などを継続的に測定し、本補修方法の耐久性を検証する予定である。

(2) 無機ライニング工法

a) 電着工法の耐久性

既に繰り返し述べてきているように、試験栈橋は、高波浪環境下にあり、特に砂の移動や巻上げが起これるので、防食にとっては非常に厳しい環境である。このような条件下にもかかわらず、電着物の物理的強度の指標となる組成比率($\text{CaCO}_3/\text{Mg}(\text{OH})_2$)は、21年間の試験期間中、ほとんど変化せず安定していた。また、電着物の年間の平均減耗量は約0.21mmと小さく、また経年的に緻密になり硬くなっていくという時効硬化も確認された。以上のことから、電着工法は耐久性に優れた防食工法といえる。

この耐久性を維持管理していくことが必要であるが、電着工法は、その性質上、海水中に施工されるので、外観観察は難しい。維持管理手法については検討中である。

電着工法は鋼構造物の防食の他に、次のような効果も期待されている。

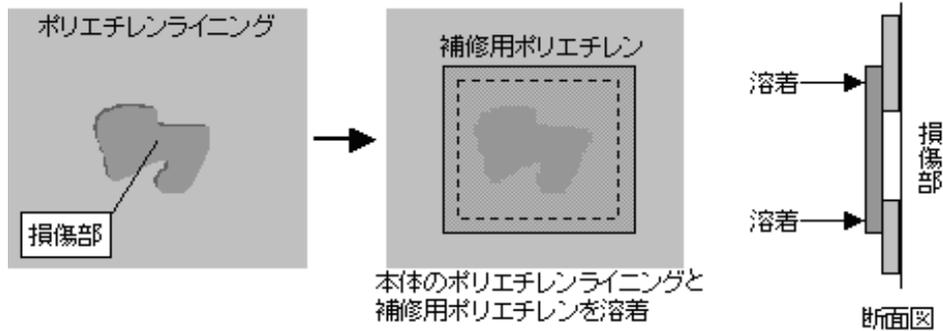


図-4.2 超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修



写真-4.2 超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修状況 (写真-B.17 参照)

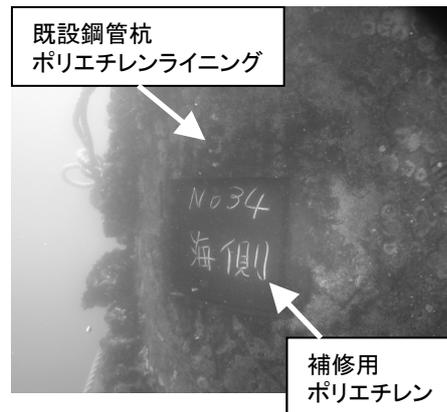


写真-4.3 超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修後の状態 (写真-B.18 参照)

- ・コンクリートのひび割れ補修
既設コンクリート構造物のひび割れ箇所を電着物で充填し、表層部を改質することで構造物の延命化が図れる。
- ・コンクリート構造物の漏水防止
コンクリート構造物のひび割れ箇所や打ち継ぎ目箇所を電着物で充填し、緻密化することで漏水を防止する。
- ・港湾構造物および周辺海域の海中での緑化
稚魚・褐藻類（遊走子）の走電性による鋼材表面への誘引効果や、ウニ・ヒトデ等の対極面の付着忌避性による食害防止効果（牧柵効果）により、港湾構造物および周辺海域における有用藻類の緑化やサンゴ造礁が期待できる。

b) CRUS 工法の施工上の注意点

CRUS 工法は鋼管杭 No. 29 に適用している。3.4(2)b) に示すように、13 年目に当たる 1997 年の調査の際、本工法で被覆した上端から 250mm 程度下の位置にコンクリート被覆層を 1 周する幅 1~3mm 程度のひび割れが発見された。

この部分は干満帯に位置し、波の影響を繰り返し受ける

厳しい環境の部分である。ひび割れの原因としては、コンクリート上端部から 200mm まで無筋構造であったことと、コンクリート打設時に鋼材表面に錆があり、長い年月の間に周囲に錆が広がって錆の膨張圧が発生したことが原因になったものと思われる。

本試験で認められたように、ひび割れを防止するには、コンクリート端部の錆を取り除くこと、無筋コンクリートを技術上の基準通り 7cm 程度にすること、またコンクリート端部の鋼管杭鋼材表面に水中硬化型エポキシ樹脂などを塗布する方法が有効であると考えられる。

また本試験では、施工方法が適切でなかったために、21 年経過時において、鋼材表面に接する最奥の地点でも、塩化物イオン量が発錆限界塩化物イオン量 (1.2kg/m³) を大きく越える高い値を示していた。しかしながら、この場合でも鉄筋や鋼管杭の表面に発錆は認められなかった。本栈橋は波浪環境下にあるため、本工法を適用した干満帯も没水している時間が長く、酸素の供給が少ないことから腐食が生じなかったものと考えられる。

しかしながら塩化物イオンは腐食誘因物質の一つであることには間違いない。発錆限界を超えるほど塩化物イオン

を含有していた原因の一つは、水中自由落下によって打設したという施工方法に起因しているものと考えられる。この施工方法では、海水を巻き込み、塩化物イオンを含んでしまう。これを防ぐためには、型枠下部に取付けた注入口から上部に向かってコンクリートを打ち上げる方法で施工しなければならない。CRUS工法を水中で施工する場合には、下部からコンクリートを打ち上げて、海水が混入しないような工夫が必要である。

(3) ペトロラタムライニング工法

a) チタンカバー工法における溶接部の耐久性

一般にカバー材の劣化は、その接合部から生じることが多い。チタンカバー工法においては、溶接部の損傷が懸念されていた。本試験においては鋼管杭 No. 6 に、フランジで接合する方式のチタンカバー工法を適用した。3.4(3)a)に示すように、カバーのフランジ部の溶接箇所は約20年間、健全に保たれていたことが明らかになった。強度も規格値を満たしており、フランジで接合する方式のチタンカバー工法には、少なくとも20年間の耐久性がある。

b) ポリエチレンカバー工法、FRPカバー工法の耐久性

ポリエチレンカバー工法は鋼管杭 No. 14 に、FRPカバー工法は鋼管杭 No. 22 に適用している。本工法における防食層はペトロラタムテープとペトロラタムペーストである。鋼材を油の中に浸しているような状態であり、油分が十分であれば腐食は生じない。本試験では3.4(3)b), c) に示すように油分残存率を測定した。部位によって値は異なるが、最大の場合では初期の15%が消耗していた。このように18年間の暴露によって油分が消耗しても、鋼材に腐食は認められず、またカバー材の引張強度は最大で30%低下していたものの、鋼管杭は良好な防食状態に維持されていたので、本防食工法は長期間の耐久性を有するものと考えられる。

今後の課題として、維持管理の視点に立ち、どの程度まで油分が消耗し、またカバー材の強度が低下することにより、どのように腐食が起ころしはじめるのかを検討していきたいと考えている。

5. 結語

本試験を開始した1980年代前半は、港湾鋼構造物が腐食による損傷を受けて港湾荷役に支障をきたし、それが社会的な問題となった時期である。そのため新しい防食工法や防食材料が開発され、実際の港湾構造物に適用され始めた。本試験は、これらの防食工法の効果や耐久性を調べることを目的として開始され、現在も継続中である。

本資料では主に、波浪の大きい過酷な海象環境に20年間暴露されても防食状態を維持していた工法について述べた。本試験で防食効果や耐久性が確認された工法は、防波堤等で囲まれた港湾区域内であれば、さらに長期間にわたり十分な防食効果を期待できるものと考えられる。

20年間の試験の途中では、いくつかの試行錯誤を経て改良、改善された技術や工法もあった。これらの防食技術や工法の耐久性については試験を継続し、今後報告していきたいと考えている。

また本試験では、維持管理手法の確立を念頭に置き、被覆材の絶縁抵抗やインピーダンスの測定技術等についても検討してきた。その結果、実験室内では有効な方法であっても、現場測定では改良すべき点が多くあることが明らかになっている。今後、既に適用している防食工法の耐久性を継続的に調査すると共に、維持管理手法の改良にも取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

本研究は、独立行政法人港湾空港技術研究所、財団法人沿岸技術研究センター、鋼管杭協会の共同研究として進めており、立案、施工、調査、維持管理などの各段階で携われた多くの方々の努力によって完成したものである。特に本共同研究会議の幹事長である吉川幸雄氏には、付録Cの防食工法の施工仕様を取りまとめていただいた。ここに関係各位に対して心より感謝の意を表します。

また本栈橋に常駐している港湾空港技術研究所漂砂研究室諸氏には、当該海域の気象・海象データを提供していただくとともに、試験の実施にあたり多くの便宜を図っていただいている。関係の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 栗山善昭・伊東啓勝：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，海岸論文集，第 51 巻，2004 年，pp. 146-150.
- 2) 運輸省港湾技術研究所・(財)沿岸開発技術研究センター・鋼管杭協会：鋼管杭の防食法に関する研究 総括報告書，1995 年 4 月，pp. 169-188.
- 3) 阿部正美・福手 勤・山本郁雄・清水一夫・真鍋昌司：波浪海域に位置する鋼構造物の電気防食に関する現地試験，港湾技研資料，No. 921，1998 年 12 月.
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)，1987 年 4 月，pp. 17-37.
- 5) 防食・補修工法研究会：港湾鋼構造物 調査診断・防食・補修工法 実務ハンドブック，2002 年 2 月，pp. 3-51.
- 6) 阿部正美・福手 勤・山本邦夫：鋼管杭の防食工法に関する現地試験(中間報告)，港湾技研資料，No. 675，1990 年 6 月.
- 7) 宮田義一・濱田秀則・阿部正美：海水中の流電陽極が干満帯部分の鋼材に及ぼす防食効果，第 25 回防錆防食技術発表大会講演予稿集，2005 年 7 月，pp. 89-92.
- 8) 阿部正美・福手 勤・清水一夫・山本郁雄：波浪海域における定電位法による電気防食試験，防錆管理，Vol. 40，1996 年 11 月，pp. 370-375.
- 9) 濱田秀則・阿部正美・小磯千代子・森島義雄：波浪海域における定電位法による電気防食試験(その 2)，第 23 回防錆防食技術発表大会講演予稿集，2003 年 7 月，pp. 55-58.
- 10) 日本道路公団：鋼構造物施工管理要領，2004 年 4 月，p. 296
- 11) 首都高速道路公団 工務部・保全施設部：コンクリート塗装及び FRP 補修基準 (案)，1991 年 10 月，p. 9
- 12) ASTM D5144-00 Standard Guide for Use of protective Coating Standard in Nuclear Power Plants，5.5.1 Adhesion，p. 492
- 13) 鋼管杭協会：防食ハンドブックー設計・施工・維持管理ー，2003 年 6 月，pp. 4-5.
- 14) 防食・補修工法研究会：港湾鋼構造物 調査診断・防食・補修工法 実務ハンドブック，2002 年 2 月，pp. 2-78.
- 15) 同上，pp. 2-80.
- 16) (社)土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002 年，p. 28.
- 17) (社)土木学会：水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案)，1991 年，p. 104.
- 18) (社)土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001 年，p. 84.
- 19) (社)土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2002 年，p. 24.
- 20) (社)土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001 年，p. 102.
- 21) 同上，p. 100.
- 22) (社)土木学会：水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案)，1991 年，p. 166.
- 23) 福手 勤・濱田秀則・山本邦夫：海洋環境に 20 年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究，土木学会論文集 No. 442/V16，1992 年，pp. 43-52.
- 24) 親泊正孝・福西 謙・石田雅巳・山本郁雄・橋本一一・清水一夫：沖縄における現地施工型防食工法の 10 年間の暴露試験結果，防錆管理，Vol. 42，1998 年 8 月，pp. 271-276.
- 25) 若林徹・望月紀保・宮田義一・濱田秀則：海水中におけるアルミニウム合金陽極の消耗量モニタリング技術に関する研究，第 52 回材料と環境討論会講演集，2005 年 9 月，pp. 477-480.
- 26) 阿部正美・濱田秀則・真壁知大・西澤信二：海洋鋼構造物の被覆防食工法に関する長期試験，港湾技研資料，No. 952，2000 年 3 月.
- 27) 吉田倫夫・佐藤一昌・中野啓眞・是永 正・阿部正美：超音波溶着法を用いた重防食鋼矢板の補修技術の開発，防錆管理，Vol. 46，2002 年 9 月，pp. 321-328.

付録

本文での記述の参考のために、付録A～Dとして、以下に記載した。各付録の記載内容は以下の通りである。

(1)付録A

付録Aでは、本文中に収めることができなかった防食工法の一覧や、試験の詳細結果などを掲載した。

(2)付録B

付録Bには、本文中の写真のカラー版を掲載した。付録の冒頭に、本文での写真番号および掲載ページの対応表を記載したので参照されたい。

(3)付録C

付録Cは、波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋で試験を実施した各防食工法について、工法の詳細とこれまでの調査記録を記載したものである。なお、外観写真は白黒写真となっているが、カラー版は付録Dに収録している。また付録の冒頭に、鋼管杭 No. と工法名、掲載頁を整理したので参照されたい。

(4)付録D

付録Dには、付録Cに記載した各防食工法の外観写真のカラー版を収録した。付録の冒頭に付録Cでの表番号および記載ページとの対応表を記載したので参照されたい。

付録 A 参考資料

付録 A 掲載資料一覧

付録 A 資料 No.	タイトル	本文 参照頁	付録 A 掲載頁
表-A.1	試験開始（1984 年）～2004 年に試験に使用した防食工法の一覧（1）	10	72
表-A.2	試験開始（1984 年）～2004 年に試験に使用した防食工法の一覧（2）	10	73
表-A.3	外観観察結果（塗装・有機ライニング工法）	41, 43, 45, 46	74
表-A.4	外観観察結果（無機ライニング工法）	47	75
表-A.5	外観観察結果（ペトラタムライニング工法）	53, 55, 56	75
表-A.6	電気防食工法試験片の回収状況（R：右側，L：左側）	32	76
表-A.7	電気防食工法試験片の 1 年後の腐食量調査結果	32	77
表-A.8	電気防食工法試験片の 8 年後，9 年後の腐食量調査結果	32	78
表-A.9	磨耗カバーの厚み調査結果	36	79

表-A.1 試験開始（1984年）～2004年に試験に使用した防食工法の一覧（1）

鋼管杭 No.	施工年月	暴露試験状況	杭径	防食範囲	防食面積	防食分類	工法名	担当会社名
1	1984年	～ 1985年11月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月(終了)	φ600	+1.17～+5.15	7.50㎡	有機ライニング*	防食シート接着ライニング工法	大日本塗料(株)
2	1984年	～ 1985年11月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月(終了)	φ600	+1.17～+5.15	7.50㎡	有機ライニング*	防食シート接着ライニング工法	大日本塗料(株)
3	1984年	～ 1998年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1998年8月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+0.40～+5.15	8.90㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +ポリエチレン樹脂カバール工法[PE工法]	日本防蝕工業(株)
4	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 1992年3月(終了)	φ600	+0.42～+5.15	8.91㎡	無機ライニング*	セメントモルタル/FRPカバー工法	昭和シェル石油(株)
5	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 1992年3月(終了)	φ600	-0.53～+5.15	10.70㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法	(株)井上商会
	2002年8月	～ 2004年4月(継続中)	φ600	-0.53～+5.15	10.70㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +耐海水性ステンレスカバー工法	(株)YAKIN川崎
6	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+3.89～+5.15	2.37㎡	塗装	水中硬化型ライニング工法	日鉄防蝕(株)
7	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+1.27～+5.15	7.31㎡	塗装	水中硬化型ライニング工法 (ペイント+パテタイプ)	日鉄防蝕(株)
	1985年8月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	-0.45～+1.27	3.24㎡	塗装	水中硬化型ライニング工法 (ペイントタイプ)	日鉄防蝕(株)
8	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 1992年3月(終了)	φ600	-0.55～+5.15	10.5㎡	無機ライニング*	セメントモルタル/FRPカバー工法	昭和シェル石油(株)
9	1984年	～ 1986年6月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1986年10月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+2.55～+5.15	4.90㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法[A法] タールウレタン系ペイント状	三井造船(株)
	1986年10月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+0.67～+5.15	3.54㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法[A法] 不飽和ポリエステル系パテ状	三井造船(株)
10	1983年4月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	-4.23～+0.67	9.23㎡	無機ライニング*	電着工法	三井造船(株)
	1984年	～ 1986年6月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1986年6月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+1.4～+5.15	7.06㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法[B法] 不飽和ポリエステル系ペイント状	三井造船(株)
	1986年6月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+0.67～+1.4	1.37㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法[B法] 不飽和ポリエステル系パテ状	三井造船(株)
11	1983年4月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	-4.23～+0.67	9.23㎡	無機ライニング*	電着工法	三井造船(株)
	1984年	～ 1986年6月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1986年6月	～ 2004年3月(継続中)	φ600	+0.67～+5.15	8.44㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法[C法] 不飽和ポリエステル系パテ状	三井造船(株)
12	1984年7月	～ 2005年3月(継続中)	φ700	±0.00～+5.50	12.10㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +FRPPカバー工法[PTC-N工法]	(株)ナカボーテック
	1984年6月	～ 1967年6月(終了)	φ700	+0.15～+5.15	11.00㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +FRVカバー工法[FRV工法]	日本防蝕工業(株)
13	1987年6月	～ 2004年4月(継続中)	φ700	+0.15～+5.15	11.00㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +ポリエチレン樹脂カバール工法[PE工法]	日本防蝕工業(株)
	2000年7月	～ 2005年3月(継続中)				電気防食	電気防食工法(流電陽極方式)	日本防蝕工業(株)
14	1984年6月	～ 1967年6月(終了)	φ700	+0.15～+5.15	11.00㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +FRVカバー工法[FRV工法]	日本防蝕工業(株)
	1997年6月	～ 2004年4月(継続中)	φ700	+0.15～+5.15	11.00㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +ポリエチレン樹脂カバール工法[PE工法]	日本防蝕工業(株)
	2000年7月	～ 2005年3月(継続中)				電気防食	電気防食工法(流電陽極方式)	日本防蝕工業(株)
15	1984年	～ 1985年8月(無防食)	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年8月	～ 2000年8月(終了)	φ700	+0.27～+5.15	10.73㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法	大日本塗料(株)
16	1984年	～ 1998年6月(無防食)	φ600	—	—	—	無防食	—
	1998年7月	～ 2004年3月(継続中)	φ700	+3.27～+5.15	4.13㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング+アクリル変成塩化 ビニールカバー工法[APC工法]	日鉄防蝕(株)
17	1984年	～ 1985年9月(無防食)	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年9月	～ 1994年3月(終了)	φ700	+0.77～+4.27	7.70㎡	無機ライニング*	GRC補強カバー工法	石川島建材工業(株)
	2000年7月	～ 2005年3月(継続中)				電気防食	電気防食工法(流電陽極方式)	日本防蝕工業(株)
18	1984年6月	～ 2004年3月(継続中)	φ700	-0.23～+5.27	12.10㎡	有機ライニング*	水中硬化型ライニング工法	関西ペイント販売(株)
	1984年7月	～ 1996年7月(終了)	φ700	±0.00～+5.50	12.10㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +FRPPカバー工法[PTC-N工法]	(株)ナカボーテック
19	1996年7月	～ 2005年3月(継続中)	φ700	±0.00～+5.50	12.10㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +FRP樹脂カバール工法[PTC-AX工法]	(株)ナカボーテック
	1984年7月	～ 1997年3月(終了)	φ700	-0.23～+5.27	12.10㎡	無機ライニング*	セメントモルタルライニング /FRPカバー工法	(株)ブリヂストン
20	2000年8月	～ 2004年3月(継続中)	φ700	+1.52～+4.52	6.60㎡	ペトロラタムライニング*	ペトロラタムライニング +耐食アルミカバー工法	住友エコーエンジ(株)
	1984年6月	～ 1997年3月(終了)	φ700	-0.23～+5.27	12.10㎡	有機ライニング*	防食テープ/FRPカバー工法	(株)ブリヂストン
	2000年8月	～ 2005年3月(継続中)	φ700	+1.45～+3.35	4.18㎡	有機ライニング*	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	(株)ナカボーテック
21	2004年6月	～ 2005年3月(継続中)	φ700	+3.35～+5.15	3.96㎡	有機ライニング*	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	(株)ナカボーテック

*1) 有効面積:設計水深から海底土中の面積を1/5に換算して算出

表-A2 試験開始（1984年）～2004年に試験に使用した防食工法の一覧（2）

鋼管杭 No.	施工年月	暴露試験状況	杭径	防食範囲	防食面積	防食分類	工法名	担当会社名
22	1984年7月	～ 2002年11月（終了）	φ700	+0.60～+5.50	10.78㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング +FRP樹脂カバー工法[PTC-A工法]	(株)ナカボーテック
	2002年11月	～ 2005年3月（継続中）	φ700	+0.60～+5.50	10.78㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング +FRP樹脂カバー工法[PTC-FL工法]	(株)ナカボーテック
	1984年7月	～ 2005年3月（継続中）	φ700	+0.60以深	16.33㎡ ^{*1}	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	(株)ナカボーテック
23	1984年	～ 2004年3月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1984年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	+0.89m以深	18.68㎡	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	日本防蝕工業(株)
24	1984年	～ 1985年7月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	-0.65～+5.15	12.70㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング+FRP樹脂カバー工法	日鉄防蝕(株)
	2001年7月	～ 2005年3月（継続中）	—	—	—	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	日本防蝕工業(株)
25	1984年	～ 1985年7月（無防食）	φ800	—	—	—	無防食	—
	1985年7月	～ 2003年7月（終了）	φ800	-1.25～+5.15	16.10㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング+FRP樹脂カバー工法	日鉄防蝕(株)
	2003年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-1.25～+5.15	16.10㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング +チタンカバー工法[TP-W工法]	日鉄防蝕(株)
26	1984年	～ 2005年3月（無防食）	φ800	—	—	—	無防食	—
	1984年6月	～ 2005年3月（継続中）	φ800	+0.89以深	25.17㎡ ^{*1}	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	(株)ナカボーテック
27	1984年8月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-1.53～+5.15	16.80㎡	有機ライニング	極厚マスキング防食工法（型枠注型工法）	日本防蝕工業(株)
	2001年7月	～ 2005年3月（継続中）	—	—	—	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	日本防蝕工業(株)
28	1984年8月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-1.53～+5.15	16.80㎡	有機ライニング	極厚マスキング防食工法（型枠注型工法）	日本防蝕工業(株)
29	1984年	～ 1997年6月（無防食）	φ800	—	—	—	無防食	—
	1984年8月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-1.23～+1.27	6.28㎡	無機ライニング	CRUS工法（補強と防食を併せ持つ工法）	吉川海事興業(株)
	1997年6月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+1.27～+5.15	9.75㎡	ベトロタムライニング	ベトロタムライニング +チタンカバー工法[TP工法]	日鉄防蝕(株)
30	1984年	～ 2004年3月（無防食）	φ800	—	—	—	無防食	—
	1984年6月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+0.89m以深	22.34㎡	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	日本防蝕工業(株)
	2001年8月	～ 2003年11月（終了）	—	—	—	電気防食	ステンレス被覆併用電気防食工法	日本防蝕工業(株)
31	1984年4月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-8.23～+5.15	33.62㎡	有機ライニング	ポリエチレンライニング工法	鋼管杭協会
	2001年7月	～ 2005年3月（継続中）	—	—	—	電気防食	電気防食工法（流電陽極方式）	日本防蝕工業(株)
31'	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+4.14～+4.84	1.75㎡	有機ライニング	Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法	鋼管杭協会
32	1984年4月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-8.23～+5.15	33.62㎡	有機ライニング	ポリエチレンライニング工法	鋼管杭協会
32'	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+4.14～+4.84	1.75㎡	有機ライニング	Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法	鋼管杭協会
33	1984年4月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-8.23～+5.25	33.88㎡	有機ライニング	ポリエチレンライニング工法	鋼管杭協会
33'	1985年7月	～ 2003年7月（終了）	φ800	+3.87～+4.57	1.75㎡	有機ライニング	Kシート融着+FRPカバー補修法	鋼管杭協会
33''	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+3.87～+4.57	1.75㎡	有機ライニング	ベトロタムライニング工法(FRPカバー法)	鋼管杭協会
34	1984年4月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-8.23～+5.25	33.90㎡	有機ライニング	ポリエチレンライニング工法	鋼管杭協会
34'	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+3.87～+4.57	1.75㎡	有機ライニング	Kシート融着+FRPカバー補修法	鋼管杭協会
35	1984年4月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	-8.23～+5.25	33.88㎡	有機ライニング	ポリエチレンライニング工法	鋼管杭協会
35'	1985年7月	～ 2004年3月（継続中）	φ800	+3.87～+4.57	1.75㎡	有機ライニング	Kシート融着+FRPカバー補修法	鋼管杭協会
K1	1984年	～ 1985年12月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年12月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.38～+6.12	8.22㎡	塗装	ガラスフレークポリエステル樹脂塗装工法	ジャパンカーボライン(株)
K2	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	関西ペイント販売(株)
K3	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	関西ペイント販売(株)
K4	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	日本ペイント(株)
K5	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 1996年3月（終了）	φ700	+2.37～+6.12	8.24㎡	塗装	厚膜型無機ジंक/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗装工法	神戸ペイント(株)
K6	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	タールエポキシ樹脂塗装工法	鋼管杭協会
K7	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2004年3月（継続中）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	タールエポキシ樹脂塗装工法	鋼管杭協会
K8	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.52～+6.12	7.91㎡	塗装	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	日本ペイント(株)
K9	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.37～+6.12	8.24㎡	塗装	水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗装工法	大日本塗料(株)
K10	1984年	～ 1985年11月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.37～+6.12	8.24㎡	塗装	ガラスフレークポリエステル樹脂 /フッ素樹脂塗装工法	大日本塗料(株)
K11	1984年	～ 1985年12月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.37～+6.12	8.24㎡	塗装	湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法	神東塗料(株)
K12	1984年	～ 1985年12月（無防食）	φ700	—	—	—	無防食	—
	1985年11月	～ 2000年3月（終了）	φ700	+2.37～+6.12	8.24㎡	塗装	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	神東塗料(株)
棧100	2000年8月	～ 2004年4月（終了）	試験片	銚子側フェンス	21枚	無機ライニング	金属溶射防食工法 (各種防食溶射材料を使用)	(株)中山製鋼所
棧300	2000年8月	～ 2004年4月（終了）	試験片	鹿島側フェンス	21枚	無機ライニング	金属溶射防食工法 (各種防食溶射材料を使用)	(株)中山製鋼所

*1) 有効面積:設計水深から海底土中の面積を1/5に換算して算出

表-A.6 電気防食工法試験片の回収状況 (R: 右側, L: 左側)

取付水深	試験片	取付位置	鋼管杭 No. 22			鋼管杭 No. 26		
			1年後 (1994年)	8年後 (2001年)	9年後 (2002年)	1年後 (1994年)	8年後 (2001年)	9年後 (2002年)
-1m	不通電	北西側	R	L	—	R	×	—
		南西側	R	L	—	R	L ^{*1)}	—
		南東側	R	L	—	R	L	—
	鞘管付	北西側	R	L	—	R	×	—
		南西側	R	L	—	R	L	—
		南東側	R	L	—	R	L	—
	通電	北西側	R	L	—	R	×	—
		南西側	R	L	—	R	L	—
		南東側	R	L	—	R	L	—
-3m	不通電	北西側	R	△	×	△	△	×
		南西側	R	△	L	△	△	R, L
		南東側	R	△	L	△	△	R, L
	鞘管付	北西側	R	△	×	△	△	×
		南西側	R	△	×	△	△	×
		南東側	R	△	×	△	△	×
	通電	北西側	R	△	L	△	△	×
		南西側	R	△	L	△	△	R, L
		南東側	R	△	L	△	△	×, L

*1) 絶縁不良のため鋼管杭と導通,

△: 埋没のため回収不能, ×: 試験片消失, —: 回収終了

表-A.7 電気防食工法試験片の1年後の腐食量調査結果 (R: 右側, L: 左側)

	水深	試験期間	試験片	設置方向	腐食速度 (mm/y)	防食率 (%)
鋼管杭 No. 22	-1 m	357 日 (1 年間)	不通電	北西側-R	0.2857	—
				南西側-R	0.2314	
				南東側-R	0.2318	
				平均値	0.2496	
			鞘管付	北西側-R	0.0654	—
				南西側-R	0.0645	
				南東側-R	0.0528	
				平均値	0.0609	
	通電	北西側-R	0.0031	98.92		
		南西側-R	0.0025	98.93		
		南東側-R	0.0027	98.84		
		平均値	0.0027	98.90		
	-3 m	357 日 (1 年間)	不通電	北西側-R	0.3884	—
				南西側-R	0.3040	
				南東側-R	0.4002	
				平均値	0.3642	
鞘管付			北西側-R	0.0429	—	
			南西側-R	0.0536		
			南東側-R	0.0265		
			平均値	0.0410		
通電	北西側-R	0.0008	99.79			
	南西側-R	0.0021	99.31			
	南東側-R	0.0027	99.33			
	平均値	0.0019	99.48			
鋼管杭 No. 26	-1 m	357 日 (1 年間)	不通電	北西側-R	0.1517	—
				南西側-R	0.1307	
				南東側-R	0.2407	
				平均値	0.1744	
			鞘管付	北西側-R	0.1475	—
				南西側-R	0.0469	
				南東側-R	0.1110	
				平均値	0.1018	
			通電	北西側-R	0.0029	98.07
				南西側-R	0.0028	97.86
				南東側-R	0.0054	97.76
				平均値	0.0037	97.90

表-A.8 電気防食工法試験片の8年後、9年後の腐食量調査結果 (R:右側, L:左側)

	水深	試験期間	試験片	設置方向	腐食速度 (mm/y)	防食率 (%)
鋼管杭 No. 22	-1 m	2918 日 (8 年間)	不通電	北西側-L	0.1483	—
				南西側-L	0.2323	
				南東側-L	0.2223	
				平均値	0.2010	
			鞘管付	北西側-L	0.0041	—
				南西側-L	0.0116	
				南東側-L	0.0068	
				平均値	0.0075	
		通電	北西側-L	0.0006	99.57	
			南西側-L	0.0006	99.74	
			南東側-L	0.0025	98.89	
			平均値	0.0012	99.40	
	-3 m	3282 日 (9 年間)	不通電	南西側-L	0.2315	—
				南東側-L	0.3037	
				平均値-L	0.2676	
			通電	北西側-L	0.0007	—
南西側-L				0.0004	99.82	
南東側-L				0.0009	99.69	
平均値				0.0007	99.76	
鋼管杭 No. 26	-1 m	2918 日 (8 年間)	不通電	南東側-L	0.2294	—
			鞘管付	北西側-L	0.0123	—
				南西側-L	0.0176	
				南東側-L	0.0250	
				平均値	0.0183	
			通電	南西側-L	0.0478	—
				南東側-L	0.0602	73.76
				平均値	0.0540	—
	-3 m	3282 日 (9 年間)	不通電	南西側-R	0.0891	—
				南西側-L	0.1259	
				南東側-R	0.1658	
				南東側-L	0.1438	
				平均値	0.1312	
			通電	南西側-R	0.0060	93.29
				南西側-L	0.0059	95.31
				南東側-L	0.0145	89.93
平均値	0.0088	92.84				

表-A.9 磨耗カバーの厚み調査結果

	試験期間	水深	方向	厚み (mm)			腐食速度 (mm/y)		
				最大値	最小値	平均値	最小値	最大値	平均値
No. 17	1996. 7. 13年間 (1回目)	-1.0m	①北西側	5.42	4.94	5.20	0.045	0.082	0.061
			②南西側	5.45	4.57	5.23	0.042	0.110	0.059
			③南東側	5.48	5.15	5.34	0.040	0.065	0.051
		-3.1m	①北西側	5.34	1.04	2.30	0.051	0.382	0.285
			②南西側	5.34	0 *3)	2.23	0.051	≥0.462	0.290
			③南東側	5.48	2.08	3.87	0.040	0.302	0.164
	*1) 2004. 6. 21年間 (2回目)	-0.5m	①北西側	3.75	0.82	1.80	0.107	0.247	0.200
			②南西側	5.66	4.50	5.32	0.016	0.071	0.032
			③南東側	5.67	2.23	4.22	0.016	0.180	0.085
		-1.0m	①北西側	2.42	0 *3)	1.22	0.171	≥0.286	0.228
			②南西側	5.37	2.89	4.51	0.030	0.148	0.071
			③南東側	5.60	4.66	5.15	0.019	0.064	0.041
No. 22 *2)	1996. 7. 13年間 (1回目)	-0.5m	①北西側	5.76	4.91	5.52	0.019	0.084	0.037
			②南西側	5.81	5.40	5.69	0.015	0.046	0.024
			③南東側	5.69	5.55	5.62	0.024	0.035	0.030
		-1.1m	①北西側	5.76	5.51	5.64	0.018	0.038	0.028
			②南西側	5.82	5.26	5.67	0.014	0.057	0.026
			③南東側	5.78	5.45	5.66	0.017	0.042	0.026
	2004. 6. 21年間 (2回目)	-1.5m	①北西側	5.76	5.11	5.54	0.011	0.042	0.022
			②南西側	5.82	5.58	5.70	0.009	0.020	0.015
			③南東側	5.81	5.58	5.69	0.009	0.020	0.015
		-3.0m	①北西側	5.75	5.19	5.59	0.012	0.039	0.020
			②南西側	5.85	5.63	5.75	0.007	0.018	0.012
			③南東側	5.75	5.36	5.64	0.012	0.031	0.017

*1) 約4年間防食期間あり (2000年陽極設置)

*2) 打設後、約1年間無防食期間あり、 *3) 貫通孔あり

付録B 写真集(本文中に掲載した白黒写真のカラー版)

付録B 掲載写真一覧

付録B 写真 No.	写真名	本文 写真 No.	本文 掲載頁	付録B 掲載頁
写真-B.1	静穏時の波崎海洋研究施設 (2000年5月30日)	写真-1.1	6	81
写真-B.2	荒天時の波崎海洋研究施設 (2001年9月24日)	写真-1.2	6	81
写真-B.3	絶縁抵抗の測定状況	写真-2.1	20	81
写真-B.4	測定ボックスの設置状況	写真-2.2	24	81
写真-B.5	除錆処理後の試験片の表面状態 (1年後)	写真-3.1	34	82
写真-B.6	除錆処理後の試験片の表面状態 (8年後, 9年後)	写真-3.2	35	83
写真-B.7	試験片の表面状態 (9年過後) [鋼管杭 No. 22, 水深-3m]	写真-3.3	36	84
写真-B.8	ポリエチレンライニング下の鋼材表面(鋼管杭 No. 32)	写真-3.4	44	84
写真-B.9	電着物の外観状況	写真-3.5	47	84
写真-B.10	中性化試験における変色の様子	写真-3.6	51	85
写真-B.11	内部鉄筋の状態	写真-3.7	52	85
写真-B.12	コア内部杭表面の状態	写真-3.8	52	85
写真-B.13	コアの杭側表面の状態	写真-3.9	52	85
写真-B.14	チタンカバー表面の汚れの様子	写真-3.12	54	85
写真-B.15	ダクトルカバーの外観状況	写真-3.13	59	85
写真-B.16	亜鉛基準電極の外観	写真-4.1	64	86
写真-B.17	超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修状況	写真-4.2	67	86
写真-B.18	超音波溶着法によるポリエチレンライニングの補修後の状態	写真-4.3	67	86



写真-B.1 静穏時の波崎海洋研究施設
(2000年5月30日) (写真-1.1 参照)



写真-B.2 荒天時の波崎海洋研究施設
(2001年9月24日) (写真-1.2 参照)



写真-B.3 絶縁抵抗の測定状況 (写真-2.1 参照)



写真-B.4 測定ボックスの設置状況 (写真-2.2 参照)

写真-B.5 除錆処理後の試験片の表面状態（1年後）（写真-3.1参照）

		鋼管杭 No. 22			鋼管杭 No. 26		
		北西側-R	南西側-R (陸側)	南東側-R	北西側-R	南西側-R (陸側)	南東側-R
水深 -1m 1年後	不通電試験片						
	鞘管付試験片						
	通電試験片						
水深 -3m 1年後	不通電試験片				埋没	埋没	埋没
	鞘管付試験片				埋没	埋没	埋没
	通電試験片				埋没	埋没	埋没

R : 右側 / L : 左側

写真-B.6 除錆処理後の試験片の表面状態 (8年後, 9年後) (写真-3.2 参照)

		鋼管杭 No. 22			鋼管杭 No. 26			
		北西側-L	南西側-L (陸側)	南東側-L	南西側-R (陸側)	南西側-L (陸側)	南東側-R	南東側-L
水深 -1m	不通電試験片				—	絶縁不良	—	
	鞘管付試験片				—		—	
	通電試験片				—		—	
水深 -3m	不通電試験片	消失						
	通電試験片						消失	

R: 右側 / L: 左側 *) 約1年間, 防食電位に達していない期間有り (陽極消耗)



a) 通電試験片(防食片) b) 不通電試験片(無防食片)

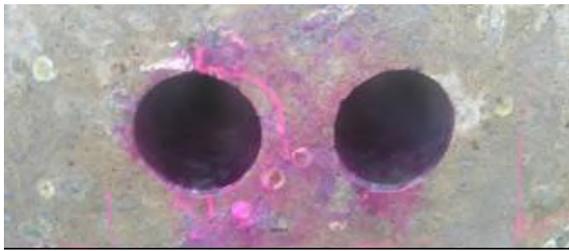
写真-B.7 試験片の表面状態(9年過後)
[鋼管杭 No. 22, 水深-3m] (写真-3.3 参照)



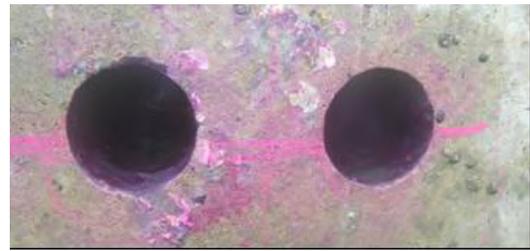
写真-B.8 ポリエチレンライニング下の鋼材表面(鋼管杭 No. 32) (写真-3.4 参照)

写真-B.9 電着物の外観状況(写真-3.5 参照)

	No. 9		No. 10		No. 11	
	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面
上部						
中央部						
下部						



海側



陸側

写真-B.10 中性化試験における変色の様子 (写真-3.6 参照)



写真-B.11 内部鉄筋の状態
(写真-3.7 参照)



写真-B.12 コア内部杭表面の状態
(写真-3.8 参照)



写真-B.13 コアの杭側表面の状態
(写真-3.9 参照)

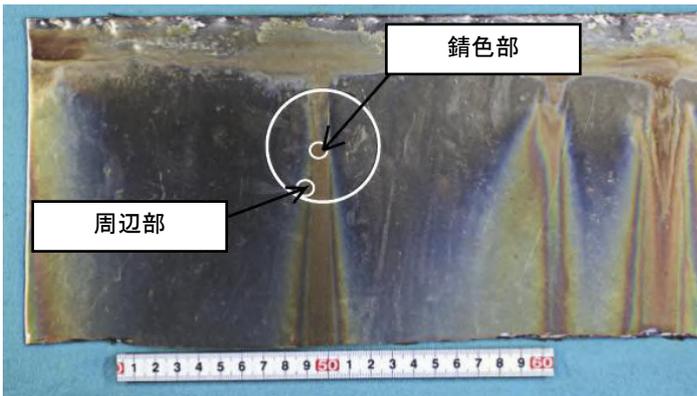


写真-B.14 チタンカバー表面の汚れの様子 (写真-3.12 参照)



写真-B.15 ダクトルカバーの外観状況
(手前：F0 奥：FM)
(写真-3.13 参照)



写真-B.16 亜鉛基準電極の外観（写真-4.1 参



写真-B.17 超音波溶着法によるポリエチレンライ
ニングの補修状況（写真-4.2 参照）

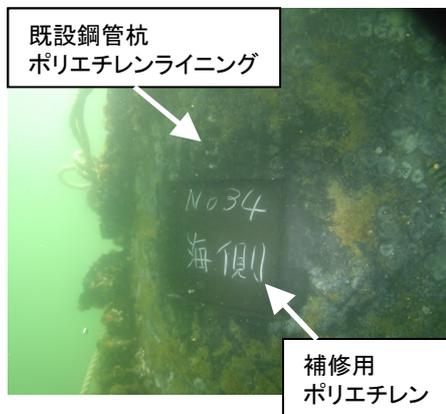


写真-B.18 超音波溶着法によるポリエチレンライニ
ングの補修後の状態（写真-4.3 参照）

付録C 各種防食工法の施工仕様

付録C 掲載工法一覧(1)

鋼管杭 No.	工法名	付録C 表No.	掲載頁
1	防食シート接着ライニング工法	表-C.1	89
2	防食シート接着ライニング工法	表-C.2	89
2	ダクトカバーモルタルライニング工法	表-C.3	90
3	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法]	表-C.4	90
4	セメントモルタル/FRP カバー工法	表-C.5	91
5	水中硬化型ライニング工法	表-C.6	91
5	ペトロラタムライニング+耐海水性ステンレス鋼カバー工法	表-C.7	92
6	水中硬化型ライニング工法	表-C.8	92
6	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [一体成型防食工法(B 法)]	表-C.9	93
7	水中硬化型ライニング工法(ペイントタイプ)	表-C.10	93
7	水中硬化型ライニング工法(ペイント+パテタイプ)	表-C.11	94
8	セメントモルタル/FRP カバー工法	表-C.12	94
9	水中硬化型ライニング工法 [A 法]	表-C.13	95
9	水中硬化型ライニング工法 [A 法]	表-C.14	95
9	電着工法	表-C.15	96
10	水中硬化型ライニング工法 [B 法]	表-C.16	96
10	水中硬化型ライニング工法 [B 法]	表-C.17	97
10	電着工法	表-C.18	97
11	水中硬化型ライニング工法 [C 法]	表-C.19	98
11	電着工法	表-C.20	98
12	ペトロラタムライニング+FRPP カバー工法 [PTC-N 工法]	表-C.21	99
13	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法]	表-C.22	99
13	ペトロラタムライニング+FRV カバー工法 [FRV 工法]	表-C.23	100
14	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法]	表-C.24	100
14	ペトロラタムライニング+FRV カバー工法 [FRV 工法]	表-C.25	101
15	水中硬化型ライニング工法	表-C.26	101
16	ペトロラタムライニング+アクリル変成塩化ビニールカバー工法 [APC 工法]	表-C.27	102
16	チタンカバーモルタルライニング工法	表-C.28	102
17	GRC 補強カバー工法	表-C.29	103
18	水中硬化型ライニング工法	表-C.30	103
19	ペトロラタムライニング+FRPP カバー工法 [PTC-N 工法]	表-C.31	104
19	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー [PTC-AX 工法]	表-C.32	104
20	セメントモルタル/FRP カバー工法	表-C.33	105
20	ペトロラタムライニング+耐食アルミカバー工法	表-C.34	105
21	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	表-C.35	106
21	防食テープ/FRP カバー工法	表-C.36	106
21	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	表-C.37	107
22	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-A 工法]	表-C.38	107
22	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-FL 工法]	表-C.39	108
22	電気防食工法(流電陽極方式)	表-C.40	108
22	電気防食工法(流電陽極方式)	表-C.41	109
23	電気防食工法(流電陽極方式)	表-C.42	109
24	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A 法)]	表-C.43	110
25	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A 法)]	表-C.44	110
25	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP-W 工法]	表-C.45	111
26	電気防食工法(流電陽極方式)	表-C.46	111
27	極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)	表-C.47	112
28	極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)	表-C.48	112
29	CRUS 工法(補強と防食を併せ持つ工法)	表-C.49	113
29	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP 工法]	表-C.50	113
30	電気防食工法(流電陽極方式)	表-C.51	114

付録C 掲載工法一覧(2)

鋼管杭 No.	工法名	表番号	掲載頁
31	ポリエチレンライニング工法	表-C.52	114
32	ポリエチレンライニング工法	表-C.53	115
33	ポリエチレンライニング工法	表-C.54	115
34	ポリエチレンライニング工法	表-C.55	116
35	ポリエチレンライニング工法	表-C.56	116
31'	Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法	表-C.57	117
32'	Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法	表-C.58	117
33'	Kシート融着+FRPカバー補修法	表-C.59	118
33''	ペトロラタムライニング防食工法(FRPカバー法)	表-C.60	118
34'	Kシート融着+FRPカバー補修法	表-C.61	119
35'	Kシート融着+FRPカバー補修法	表-C.62	119
K1	ガラスフレークポリエステル樹脂塗装工法	表-C.63	120
K2	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	表-C.64	120
K3	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	表-C.65	121
K4	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.66	121
K5	厚膜型無機ジンク/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗装工法	表-C.67	122
K6	タールエポキシ樹脂塗装工法	表-C.68	122
K7	タールエポキシ樹脂塗装工法	表-C.69	123
K8	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.70	123
K9	水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗装工法	表-C.71	124
K10	ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗装工法	表-C.72	124
K11	湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法	表-C.73	125
K12	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.74	125
栈 100	金属溶射防食工法	表-C.75	126
栈 300	金属溶射防食工法	表-C.76	127

表-C.1 鋼管杭 No.1 防食シート接着ライニング工法の概要と調査記録

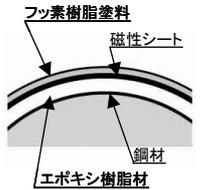
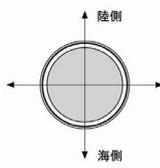
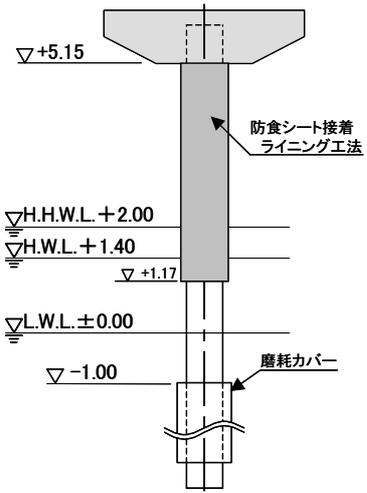
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1985年 11月	施 工
施工面積	7.50 m ²	1986年 6月	下部シート部に点錆数箇所発生
施工範囲	+1.17~+5.15	1987年 6月	床版下面シートに浮きが発生
素地調整	サンドブラスト SIS-Sa2.0	1988年 7月	剥離テストを実施した。発錆なし。
工法の特徴	鋼管杭表面の素地調整後、鋼面に接着剤(エポキシ樹脂)を塗布し、その上からシート(特殊磁性防食シート)を貼り付け、フッ素系上塗り塗料を塗布する防食法。	1990年 8月	付着力・インピーダンス測定実施
		1991年 8月	海側下部シートが40cm幅で剥離
		1993年 8月	海側+4.0mに直径5cm剥離発生
		1994年 7月	付着力・インピーダンス測定実施
		1996年 8月	インピーダンス測定実施
		1998年 7月	インピーダンス測定実施
		1999年 7月	海側下部は砂の堆積で観察出来ず
		2000年 3月	終了
施工フロー			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>素地調整</p> <p>↓</p> <p>エポキシ系接着材塗布</p> <p>↓</p> <p>特殊磁性防食シート貼り</p> <p>↓</p> <p>フッ素系塗料上塗り</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div> <p>防食仕様 下層：エポキシ樹脂系水中防食材 中層：特殊磁性防食シート 上層：フッ素系塗料</p>			
			
		2004年の外観写真(海側上部)	
		 <p>(写真-D.1 参照)</p>	

表-C.2 鋼管杭 No.2 防食シート接着ライニング工法の概要と調査記録

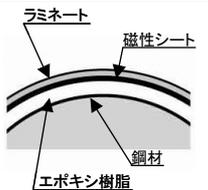
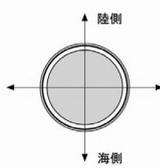
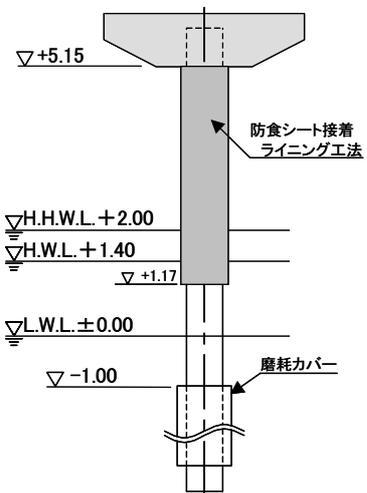
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1985年 11月	施 工
施工面積	7.50 m ²	1986年 6月	70×100mmの剥離1箇所(補修)
施工範囲	+1.17~+5.15	1987年 6月	補修箇所の異状は認められなかった
素地調整	サンドブラスト SIS-Sa2.0		
工法の特徴	鋼管杭表面の素地調整後、鋼面に接着剤(エポキシ樹脂)を塗布し、その上からシート(特殊磁性防食シート)を貼り付け、上層部にはラミネートを貼り、下半部は銅箔シートを貼る防食法。	1988年 7月	床版部から錆汁の流れ発生
		1990年 8月	海側のシートに小さい亀裂発生
		1991年 8月	補修箇所に微細な亀裂発生
		1993年 8月	亀裂の進行は認められなかった
		1994年 7月	著しい劣化傾向は認められなかった
		1996年 8月	変化なく良好な状態だった
		1998年 7月	若干錆汁の量が増加傾向
		1999年 7月	13年間の実績として良好
2000年 3月	終了		
施工フロー			
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>素地調整</p> <p>↓</p> <p>エポキシ系接着材塗布</p> <p>↓</p> <p>特殊磁性防食シート貼り</p> <p>↓</p> <p>ラミネート貼り (下半部銅箔シート)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div> <p>防食仕様 下層：エポキシ樹脂系水中防食材 中層：特殊磁性防食シート 上層：ラミネート</p>			
			
		2004年の外観写真(海側上部)	
		 <p>(写真-D.2 参照)</p>	

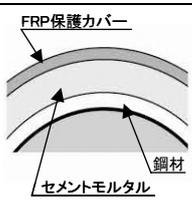
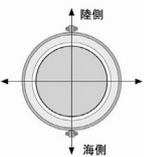
表-C.3 鋼管杭 No.2 ダクタリカバーモルタルライニング工法の概要と調査記録

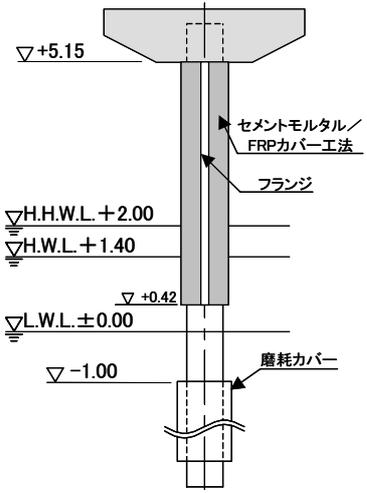
防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	2000年3月	防食シート接着ライニング工法(脱会)
施工面積	3.39 m ²		
施工範囲	+1.40~+3.20	2003年4月	旧防食工法跡を撤去後、施工
素地調整	サンドブラスト SIS-Sa2.0		
工法の特徴	ダクタリは反応性微粉末を使用した無機系複合材料でセメントをベースとする高強度で耐磨耗性や耐衝撃性に優れた材料で、カバー内部に充填する無収縮モルタルの強いアルカリで鋼管表面に不動態被膜を形成する防食法。		
	施工フロー		
	被覆材の構成図		
		断面形状図	
防食仕様	下層：無収縮グラウトモルタル(ピタシール) 上層：ダクタリカバー(肉厚20mm) シール施工(変成シリコン)		
2004年の外観写真(海側中間部)			
(写真-D.3 参照)			

表-C.4 鋼管杭 No.3 ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1984年4月	無防食
施工面積	8.95 m ²	1998年8月	無防食
施工範囲	+0.40~+5.15	1998年8月	施工(同時施工：モニタリング装置取付)
素地調整	第3種ケレン		
工法の特徴	ポリエチレンを保護カバーに活用したペトロラタムライニング防食法。肉厚4.5mmのポリエチレン同士の接合部は熱融着で一体化しフランジ部を無くした工法。		
	1999年7月 良好な状態が保たれていた		
	2002年8月 良好、固定装着状態も良好		
	2004年7月 インピーダンス測定の結果、抵抗値の低下および tan δ の上昇が認められる		
施工フロー			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様	下層：ペーストテープ 中層：防食テープ 上層：ポリエチレン保護カバー(肉厚4.5mm)		
2004年の外観写真(海側上部)			
(写真-D.4 参照)			

表-C.5 鋼管杭 No. 4 セメントモルタル/FRP カバー工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1985年 8月	施 工
施工面積	8.91 m ²	1986年 6月	異状は認められなかった
施工範囲	+0.42~+5.15	1988年 7月	剥離調査の実施
素地調整	ケレン後ディスクサンダー	1989年 7月	異状は認められなかった
工 法 の 特 徴	FRP カバーと鋼管杭の間にセメントモルタルを充填し、養生硬化して鋼管杭に被覆する防食法。セメントモルタルにはラテックス系ポリマーを入れ被覆厚は25mmとした。	1990年 8月	モルタル吹付部にふくれ発生(補修)
		"	モニタリング(電位計測)を開始する
		1991年 7月	異状は認められなかった
		1992年 3月	終了
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[FRPカバー取付] B --> C[ポリマーモルタル充填] </pre> </div> <div style="width: 45%;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div>			
防食仕様		下層：セメントモルタル (ラテックス系ポリマー、被覆厚 25mm) 上層：FRP カバー	

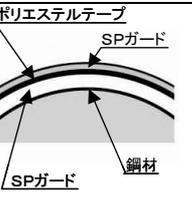
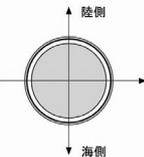


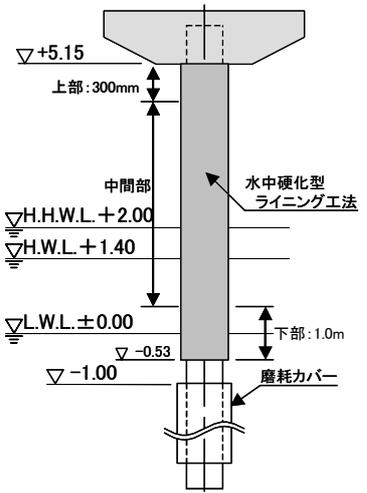
2004年の外観写真(海側上部)



(写真-D.5 参照)

表-C.6 鋼管杭 No. 5 水中硬化型ライニング工法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1985年 8月	施 工
施工面積	10.7 m ²	1986年 6月	上端部から錆汁が流れていた
施工範囲	-0.53~+5.15	1987年 7月	鋼管杭施工跡の塗膜が全面的に発錆
素地調整	ケレン後ディスクサンダー	1988年 7月	施工跡の発錆状態から施工不良と認知
工 法 の 特 徴	気中部では、下地処理を行った後に粘度の高い材料をコテまたは手で丁寧に塗布し、水没部では塗膜硬化するまで波浪の影響で剥離しないようステンレス製の金網で補強して被覆する防食法。	1989年 7月	上端部の錆汁部の補修を行う
		1990年 7月	退色が認められるが異状はない
		1991年 7月	施工跡の発錆箇所の補修を行う
		1992年 3月	終了
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[上部300mm 素地調整] --> B[SPガードコテ塗り] B --> C[ポリエステルテープ巻き] C --> D[SPガードコテ塗り] </pre> </div> <div style="width: 45%;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div>			
防食仕様		(1) 上部 300mm 下層：SP ガード(エポキシ系) 1.5~2.0mm 厚 中層：ポリエステルテープ 上層：下層と同じ (2) 中間部：SP ガード A4.0mm 厚 (3) 下部 1m 下層：SP ガード A1.5~2.0mm 厚 中層：金網シート 上層：SP ガード A2.0~3.0mm	



2004年の外観写真(海側中間部)



(写真-D.6 参照)

表-C.7 鋼管杭 No. 5 ペトロラタムライニング+耐海水性ステンレス鋼カバー工法の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1992 年 3 月	
施工面積	10.7 m ²	2002 年 8 月	旧防食工法跡を撤去後、施工
施工範囲	-0.53~+5.15	2003 年 7 月	特に異状は認められなかった
素地調整	ケレン後ディスクサンダー	2004 年 7 月	特に異状は認められなかった
工法の特徴	ペトロラタム防食工法において、特に耐食性が優れている 2 種類の耐海水性ステンレス鋼 (NAS254N・NAS185N) を保護カバーとして防食層を構成した防食工法。		
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ペトロラタムペースト</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ペトロラタム防食テープ</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ポリエチレン製 独立発砲緩衝材取付</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">耐海水性ステンレス鋼 保護カバー取付</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">カバー上端隙間部エポキシ樹脂充填</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様	下層：ペトロラタムペースト 中層：ペトロラタム防食テープ 上層：耐海水性ステンレス鋼保護カバー カバー上端隙間部エポキシ樹脂充填(シール)		
2004 年の外観写真(海側中間部)			
(写真-D.7 参照)			

表-C.8 鋼管杭 No. 6 水中硬化型ライニング工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1985 年 8 月	施 工
施工面積	2.37 m ²	1986 年 6 月	上端部から僅かな錆汁が流れていた
施工範囲	+3.89~+5.15	2001 年 7 月	異状は無いが僅かに錆が進行している
素地調整	SIS—Sa2.5		
工法の特徴	素地調整の後、水中硬化型塗料(エポキシ樹脂)300 μ を下塗りし、次に同塗料を 300 μ 上塗りする防食工法。		
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">水中硬化型塗料下塗り 300μ</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">水中硬化型塗料上塗り 300μ</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様	水中硬化型塗料(エポキシ樹脂) 下塗り：300 μ 上塗り：300 μ		
2004 年の外観写真(海側上部)			
(写真-D.8 参照)			

表-C.9 鋼管杭 No.6 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [一体成型防食工法(B法)] の概要と調査記録

防食分類		ペトロラタムライニング		主な調査記録	
杭径	φ600mm	1985年8月	施工		
施工面積	7.54 m ²	1989年8月	チタンカバー上端一部に虹色の変色		
施工範囲	-0.11~+3.89				
素地調整	サンドブラスト SIS—Sa2.0	1998年8月	異状は認められない		
工法の特徴	一体成型防食体(B法)は、特に耐食性に優れて軽量であるチタン合金を用いた保護層と緩衝層および防食層から構成された防食工法で、あらかじめ工場で一体に成型されたものを鋼管杭に取り付けて防食する工法。	2003年7月	異状は認められない		
施工フロー					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体 (B法) 工場製作</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体 (B法) の取付</div> </div>					
被覆材の構成図		断面形状図			
防食仕様		防食層：ペトロラタムペースト 2.5kg/m ² 緩衝層：発泡ポリウレタンシート 5mm厚 上層：チタンシート(保護カバー)			
2004年の外観写真(海側中間部)					
(写真-D.9 参照)					

表-C.10 鋼管杭 No.7 水中硬化型ライニング工法(ペイントタイプ)の概要と調査記録

防食分類		塗装		主な調査記録	
杭径	φ600mm	1985年8月	施工		
施工面積	7.31 m ²	1986年6月	塗膜にふくれ、上端部より錆汁発生		
施工範囲	+1.27~+5.15	"	施工跡の突起物上の塗膜に点錆発生		
素地調整	サンドブラスト SIS—Sa2.5				
工法の特徴	ペイントとパテタイプがあり、共に水中用として開発された無溶剤型エポキシ系重防食塗料で、飛沫帯、干満帯、水中部に適用可能。複雑な形状の構造物にも容易に施工できる防食工法。	1992年8月	塗膜の一層目が半分程度剥離点錆多い		
		1997年6月	点錆が多くなった		
		2002年7月	点錆が多くなった		
		2003年7月	点錆が多く塗膜の劣化で鋼の腐食増大		
施工フロー					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">水中硬化型塗料下塗り</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">水中硬化型塗料上塗り</div> </div>					
被覆材の構成図		断面形状図			
防食仕様		二液硬化型塗料(エポキシ系) 下塗り：300μ 上塗り：300μ			
2004年の外観写真(海側上部)					
(写真-D.10 参照)					

表-C.11 鋼管杭 No.7 水中硬化型ライニング工法(ペイント+パテタイプ)の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録		
杭 径	φ 600mm	1985年 8月	施 工	
施工面積	3.24 m ²	1986年 6月	塗膜にふくれ発生	
施工範囲	-0.45~+1.27	1990年 8月	異状は認められない	
素地調整	サンドブラスト SIS—Sa2.5	1999年 7月	異状は認められない	
工 法 の 特 徴	ペイントとパテタイプがあり、共に水中用として開発された無溶剤型エポキシ系重防食塗料で、飛沫帯、干満帯、水中部に適用可能。複雑な形状の構造物にも容易に施工できる防食工法。	2001年 7月	異状は認められない	
		2003年 7月	海側面のパテに一部剥離が認められる	
		"	下地のペイントは残存し異状なかった	
<p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[ペイント下塗り (水中硬化型塗料)] B --> C[ペイント上塗り (水中硬化型塗料)] C --> D[ステンレス金網の取付] </pre>				<p>2004年の外観写真(海側上部)</p> <p>(写真-D.11 参照)</p>
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	<p>下 層：二液硬化型塗料(エポキシ系) ペイント下塗り 300μ ペイント上塗り 300μ</p> <p>中間層：ステンレス金網</p> <p>上 層：二液硬化型塗料(エポキシ系) 2~5mm厚</p>			

表-C.12 鋼管杭 No.8 セメントモルタル/FRP カバー工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 600mm	1985年 8月	施 工	
施工面積	10.5 m ²	1986年 6月	異状は認められなかった	
施工範囲	-0.55~+5.15	1988年 7月	剥離調査の実施	
素地調整	ケレン後ディスクサンダー	1989年 7月	異状は認められなかった	
工 法 の 特 徴	FRP カバーと鋼管杭の間にセメントモルタルを充填し、養生硬化して鋼管杭に被覆する防食法。セメントモルタルにはラテックス系ポリマーを入れ被覆厚は25mmとした。	1991年 7月	異状は認められなかった	
		1992年 3月	終了	
<p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[FRPカバー取付] B --> C[ポリマーモルタル充填] </pre>				<p>2004年の外観写真(海側上部)</p> <p>(写真-D.12 参照)</p>
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	<p>下層：セメントモルタル (ラテックス系ポリマー、被覆厚 25mm)</p> <p>上層：FRP カバー</p>			

表-C.13 鋼管杭 No.9 水中硬化型ライニング工法 [A法] の概要と調査記録

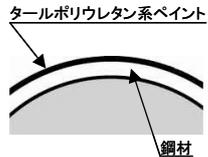
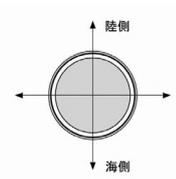
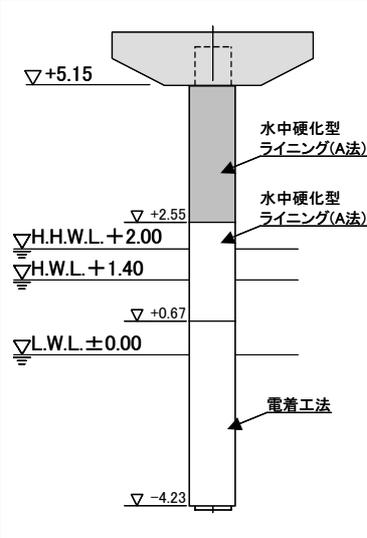
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1986年6月	無防食
施工面積	4.90 m ²	1986年6月	施 工
施工範囲	+2.55~+5.15	1987年6月	上端部点錆, 取付ピース跡エッジ部に点錆数箇所認められたが他は異状ない
素地調整	SIS—Sa2.0	1990年7月	特に異状は認められない. 試験を終了
工法の特徴	タールポリウレタン系樹脂は, 干満帯から飛沫帯への適用ができ, 短時間で硬化するペイントタイプのライニング材で, エアレス塗装で施工する防食工法.		
	施工フロー		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> </div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">タールポリウレタン系ライニング材 (ペイント状) エアレス塗装 0.6mm厚以上</div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様	タールポリウレタン系ライニング材 (ペイント状) エアレス塗装 0.6mm厚以上		
			
			

表-C.14 鋼管杭 No.9 水中硬化型ライニング工法 [A法] の概要と調査記録

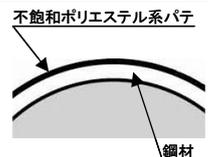
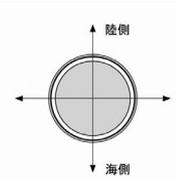
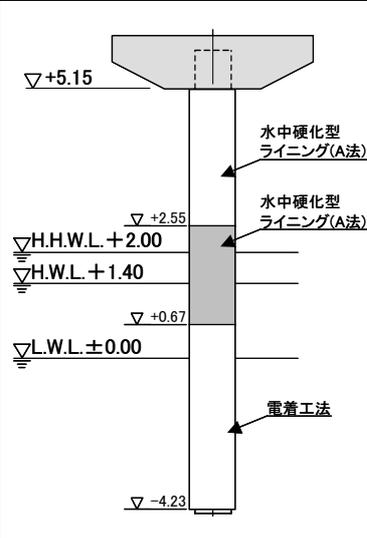
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1986年6月	無防食
施工面積	3.54 m ²	1986年6月	施 工
施工範囲	+0.67~+2.55	1987年6月	上端部点錆, 取付ピース跡エッジ部に点錆数箇所認められたが他は異状ない
素地調整	SIS—Sa2.0	1990年7月	特に異状は認められない. 試験を終了
工法の特徴	湿潤面施工用として開発された不飽和ポリエステル系樹脂を主成分とする重防食ライニング材で, 硬化が早く高粘度であるため波浪による被膜の剥落等が無く水中部から飛沫帯に適用できる防食工法.		
	施工フロー		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> </div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">不飽和ポリエステル系パテ (コテ塗り3mm厚以上)</div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様	不飽和ポリエステル系ライニング材 (パテ状) コテ塗り 3mm厚以上		
			
			

表-C.15 鋼管杭 No.9 電着工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 600mm	1983年4月	4月～10月まで施工(通電)	
施工面積	9.23 m ²	1984年7月	電着物の表面の磨滅、損傷はなく良好	
施工範囲	-4.23～+0.67			
素地調整	なし	1992年8月	電着物の表面の磨滅、損傷はなく良好	
工法の特徴	素地調整が不要で施工が簡単(海象条件に大きく左右されない)電着物の組成比率(Ca/Mg)やpHの経年変化は小さく耐劣化性、耐磨耗性、遮水性に優れた防食工法。	1995年7月	陸側、海側共点錆が数箇所確認	
		2001年6月	電着物の表面の磨滅、損傷はなく良好	
		2003年7月	電着物の表面の磨滅、損傷はなく良好	
施工フロー		被覆材の構成図		
		電圧：3.5～6.0V 電流：12～30A 条件：金網付き附着厚：5～15cm		
				2004年の外観写真(海側)
				<p>(写真-D.15 参照)</p>

表-C.16 鋼管杭 No.10 水中硬化型ライニング工法 [B法] の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 600mm	1986年6月	無防食	
施工面積	7.06 m ²	1986年6月	施工	
施工範囲	+1.40～+5.15	1987年6月	特に異状は認められない	
素地調整	SIS—Sa2.0	1990年7月	特に異状は認められない。試験を終了	
工法の特徴	湿潤面施工用として開発された不飽和ポリエステル系樹脂を主成分とする重防食ライニング材で、硬化が早く高粘度であるため波浪による被膜の剥落等が無く水中部から飛沫帯に適用できる防食工法。			
施工フロー		被覆材の構成図		
		下塗り：不飽和ポリエステル系ライニング材 (ペイント状) エアレス塗装 上塗り：同上 膜厚合計 0.7mm 以上		
				2004年の外観写真(海側)
				<p>(写真-D.16 参照)</p>

表-C.17 鋼管杭 No. 10 水中硬化型ライニング工法 [B法] の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1986年6月	無防食
施工面積	1.37 m ²	1986年6月	施 工
施工範囲	+0.67~+1.40	1987年6月	特に異状は認められない
素地調整	SIS—Sa2.0	1990年7月	特に異状は認められない。試験を終了
工法の特徴	湿潤面施工用として開発された不飽和ポリエステル系樹脂を主成分とする重防食ライニング材で、硬化が早く高粘度であるため波浪による被膜の剥落等が無く水中部から飛沫帯に適用できる防食工法。		
	施工フロー		
	被覆材の構成図	断面形状図	
防食仕様	不飽和ポリエステル系ライニング材 (パテ状) コテ塗り 3mm 厚以上		
2004年の外観写真(海側)			
(写真-D.17 参照)			

表-C.18 鋼管杭 No. 10 電着工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 600mm	1983年4月	4月~10月まで施工(通電)
施工面積	9.23 m ²	1984年7月	電着物表面の磨滅、損傷はなく良好
施工範囲	-4.23~+0.67	1992年8月	電着物表面の磨滅、損傷はなく良好
素地調整	なし	1998年6月	干満帯で点錆が数箇所確認
工法の特徴	素地調整が不要で施工が簡単(海象条件に大きく左右されない)電着物の組成比率(Ca/Mg)や pH の経年変化は小さく耐劣化性、耐磨耗性、遮水性に優れた防食工法。		
	2001年6月 干満帯の点錆は変化がない		
	2003年7月 電着物表面の磨滅、損傷はなく良好		
	2004年7月 電着物表面の磨滅、損傷はなく良好		
施工フロー			
被覆材の構成図	断面形状図		
防食仕様	電圧：4.0~4.5V 電流：8~18A 条件：金網付き付着厚：5~10cm		
2004年の外観写真(海側)			
(写真-D.18 参照)			

表-C.19 鋼管杭 No. 11 水中硬化型ライニング工法 [C法] の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録					
杭 径	φ 600mm	1986年6月	無防食				
施工面積	8.44 m ²	1986年6月	施 工				
施工範囲	+0.67~+5.15	1987年6月	特に異状は認められない				
素地調整	SIS—Sa2.0	1990年7月	特に異状は認められない. 試験を終了				
工法の特徴	湿潤面施工用として開発された不飽和ポリエステル系樹脂を主成分とする重防食ライニング材で、硬化が早く高粘度であるため波浪による被膜の剥落等が無く水中部から飛沫帯に適用できる防食工法。						
	施工フロー						
	<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>			被覆材の構成図	断面形状図		
被覆材の構成図	断面形状図						
防食仕様	<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>			被覆材の構成図	断面形状図		
被覆材の構成図	断面形状図						
2004年の外観写真(海側)							
<p>(写真-D.19 参照)</p>							

表-C.20 鋼管杭 No. 11 電着工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録					
杭 径	φ 600mm	1983年4月	4月~10月まで施工(通電)				
施工面積	9.23 m ²	1984年7月	電着物表面の磨滅、損傷はなく良好				
施工範囲	-4.23~+0.67	1992年8月	電着物表面の磨滅、損傷はなく良好				
素地調整	なし	1998年6月	干満部の海側・陸側の一部に漂流物の衝撃と思われる20cm大の剥離を確認				
工法の特徴	素地調整が不要で施工が簡単(海象条件に大きく左右されない)電着物の組成比率(Ca/Mg)や pH の経年変化は小さく耐劣化性、耐磨耗性、遮水性に優れた防食工法。						
	1999年5月 海側の+1.0m~-0.2mから電着物を採取、肉厚測定や組成分析等の調査を実施した。調査跡の被覆補修を行った						
	2000年6月 補修箇所には異状はなかった。電着物表面の磨滅、損傷はなく良好						
	2002年7月 電着物表面の磨滅、損傷はなく良好						
施工フロー							
<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>				被覆材の構成図	断面形状図		
被覆材の構成図	断面形状図						
防食仕様	電圧：3.0~4.0V 電流：8~16A 条件：金網なし付着厚：4~9cm						
2004年の外観写真(海側)							
<p>(写真-D.20 参照)</p>							

表-C.21 鋼管杭 No. 12 ペトロラタムライニング+FRPP カバー工法 [PTC-N 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年 7月	施工.
施工面積	12.1 m ²	1985年 11月	保護カバー接続部(陸側)の一部に錆汁確認.
施工範囲	±0.00~+5.50	1987年 6月	接続部バンド脱落(2ヶ所), 補修.
素地調整	第3種ケレン	1993年 7月	鋼素地面の調査実施, 防食シート表面に変色あり, 鋼素地面異状なし.
工法の特徴	ペトロラタム系防食材(粘着性・非水溶性・撥水性・揮発性・電気絶縁性に優れた性質を有する)とその防食材を保護する保護材(FRPP 製カバー)との組み合わせによる防食システム.	1998年 6月	ボルト試験片設置(陸側フランジ部3ヶ所). 保護カバー特に異状なし.
		1999年 8月	ボルト試験片一部回収. 保護カバー特に異状なし.
		2001年 7月	海側3段目カバー接続部剥離, バンドで補修.
		2002年 7月	3段目カバーをPTC-A工法で補修.
施工フロー			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様		下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムシート 上層: FRPP 保護カバー(6段) FRPP カバー接続部バンド締付け(5箇所)	
2004年の外観写真(海側中間部)			
(写真-D.21 参照)			

表-C.22 鋼管杭 No. 13 ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年 6月	施工
施工面積	11.00 m ²	1985年 10月	FRV 保護カバーに異状なし, 良好
施工範囲	+0.15~+5.15	1986年 6月	+2.3~+4.0m のFRV カバー破損, 厚さ4.5mmのPEカバーに交換.
素地調整	第3種ケレン	1988年 8月	特に異状なし. カバー接続部のバンド(SUS304)から若干の錆汁確認
工法の特徴	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. 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防食工法.	1990年 8月	モニタリング装置取付 (+4.26/+2.76m)
		1991年 7月	+2.76m 部のモニタリング装置が補修用 PE カバーの溶着不良より脱落. 補修
		2003年 7月	カバーの表面状態及び固定装着状態とも良好. インピーダンス測定結果, 抵抗値の低下 tan δの上昇.
		施工フロー	
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様		下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: (初期)FRV 保護カバー (3年後): ポリエチレン保護カバー (PE)に交換	
2004年の外観写真(海側上部)			
(写真-D.22 参照)			

表-C.23 鋼管杭 No. 13 ペトロラタムライニング+FRV カバー工法 [FRV 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1984年 6月	施 工	
施工面積	11.00 m ²	1985年 10月	FRV 保護カバーに異状なし, 良好	
施工範囲	+0.15~+5.15	1986年 6月	異状なし	
素地調整	第3種ケレン	1987年 6月	+2.3~+4.0mのFRV カバー破損. 終了後 PE 工法に交換.	
工法の特徴				
施工フロー 素地調整 ↓ ペトロラタムペースト ↓ ペトロラタムテープ ↓ FRV保護カバー取付				
		被覆材の構成図	断面形状図	
		防食仕様	下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: FRV 保護カバー	

表-C.24 鋼管杭 No. 14 ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1984年 6月	施 工	
施工面積	11.0 m ²	1985年 4月	FRV カバー損傷. +1.86~+3.86の素地調整を施しFRV カバーを交換	
施工範囲	+0.15~+5.15	1986年 6月	異状は認められなかった	
素地調整	第3種ケレン	1987年 6月	耐久性を考慮してPE カバーと交換	
工法の特徴	ポリエチレンの特性を活かし, 平板PE カバー端部に予め取付けられている特殊熱電線に直流電流を流して接合部を熔融し溶着して, カバーを固定装着させる工法. 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防食工法.	1988年 8月	異状はなく良好であった	
		1989年 7月	+0.15~+2.15m 部のカバー取り除き解放点検を実施. 異状はなかった	
		1993年 8月	上端部とステンレスバンドから若干錆汁	
		1998年 7月	特に異状はなく良好な状態	
		2002年 11月	PE カバーを全部取除き開放点検実施. 鋼面の観察および肉厚測定結果より 18年間良好な防食状態で維持されていた事が確認された.	
施工フロー 素地調整 ↓ ペトロラタムペースト ↓ ペトロラタムテープ ↓ (初期)FRV保護カバー取付 (3年後)ポリエチレンカバーと交換				
		被覆材の構成図	断面形状図	
		防食仕様	下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: (初期)FRV 保護カバー (3年後)ポリエチレン保護カバー (PE) に交換	

表-C.25 鋼管杭 No. 14 ペトロラタムライニング+FRV カバー工法 [FRV 工法] の概要と調査記録

防食分類		ペトロラタムライニング		主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年 6月	施 工		
施工面積	11.0 m ²	1985年 4月	FRV カバー損傷. +1.86~+3.86の素地調整を施し新しい FRV カバーと交換		
施工範囲	+0.15~+5.15				
素地調整	第3種ケレン				
工法の特徴		1986年 6月	異状は認められなかった		
		1987年 6月	FRV カバー工法は耐久性を考慮して終了. PE カバーと交換		
施工フロー					
<div style="text-align: center;"> </div>					
		被覆材の構成図		断面形状図	
		防食仕様 下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: FRV 保護カバー			
2004年の外観写真(海側下部)					
(写真-D.25 参照)					

表-C.26 鋼管杭 No. 15 水中硬化型ライニング工法の概要と調査記録

防食分類		有機ライニング		主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年 4月	無防食		
施工面積	10.73 m ²	1985年 8月	施 工		
施工範囲	+0.27~+5.15	1987年 6月	異状は見られず良好であった		
素地調整	SIS—Sa2.0	1988年 7月	剥離テスト実施, 良好		
工法の特徴	いかなる形状の構造物にも適用でき, 新設・既設構造物共に施工が軽便であること, 補修にも容易である特徴を持つ防食工法.	1990年 8月	付着力テスト, 絶縁抵抗測定実施, 良好		
		1991年 8月	剥離テスト実施, 良好		
		1994年 7月	塗膜剥離後に素地状態を観察, 良好		
		1995年 8月	塗膜剥離後に素地状態を観察, 良好		
		1996年 8月	絶縁抵抗測定を実施		
		1996年 8月	表面に微細なヘアークラックが発生		
施工フロー					
<div style="text-align: center;"> </div>					
		被覆材の構成図		断面形状図	
		防食仕様 エポキシ樹脂系水中硬化型被覆防食材 5mm 厚			
2004年の外観写真(海側上部)					
(写真-D.26 参照)					

表-C.27 鋼管杭 No. 16 ペトロラタムライニング+アクリル変成塩化ビニールカバー工法 [APC工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1997年6月	1985年時より無防食状態	
施工面積	4.13 m ²	1998年7月	(上部) APCカバーペトロラタム工法を施工	
施工範囲	+3.27~+5.15	1999年8月	APCカバーに異状は認められなかった	
素地調整	SIS-St2			
工法の特徴	アクリル変成塩化ビニール (APC) を保護カバーとしてペトロラタム防食する防食工法。	2000年7月	工法開発担当者が脱会. 他の担当者が調査を継続する. 異状は認められなかった	
		2001年7月	特に異状は認められない	
		2003年7月	異状は認められない	
<p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[ペーストテープ巻き] B --> C[防食テープ巻き] C --> D[APC保護カバー取付] D --> E[端末シート処理] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		2004年の外観写真(海側上部)
防食仕様		下層: ペトロラタムペースト 中層: 防食テープ 上層: APC 保護カバー APC: アクリル変成塩化ビニール(肉厚 2mm)		<p>(写真-D.27 参照)</p>

表-C.28 鋼管杭 No. 16 チタンカバーモルタルライニング工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1998年6月	1984年時より無防食状態	
施工面積	6.60 m ²	1997年7月	(下部) チタンカバーモルタルライニング工法を施工	
施工範囲	+0.27~+3.27	2000年7月	工法開発担当者が脱会. 他の担当者が調査を継続する. チタンカバー海側に黒色で粘度のある物が付着している	
素地調整	SIS-St2	2001年7月	特に異状は認められない	
工法の特徴	耐食性に優れたチタンをカバーとしてセメントモルタルをカバー内部に充填する工法で, モルタルの防食効果と外面に耐食性に優れたチタンカバーを用いることで長期耐久性を目的とした防食工法。	2003年7月	チタンカバー海側に黒色で粘度のある物が付着しているが異状は認められない	
<p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B["(下部) チタンカバー取付"] B --> C["(下部) モルタル注入"] C --> D[アルミニウム合金陽極取付 2個] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		2004年の外観写真(海側中間部)
防食仕様		下層: モルタル 高炉セメントB種 5cm厚 上層: チタンシート製カバー 0.5mm厚 他: 電気防食材(アルミニウム合金×2個, 重量 26.7kg以上, 発生電流 1.79A, 耐用寿命約 8年)		<p>(写真-D.28 参照)</p>

表-C.29 鋼管杭 No. 17 GRC 補強カバー工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録			
杭径	φ700mm	1985年9月	施工		
施工面積	7.70 m ²	1986年6月	カバーバンドの発錆が認められるが良好		
施工範囲	+0.77~+4.27	1987年7月	バンドの発錆が増大. 他に異状はない		
工法の特徴	耐摩耗性, 耐衝撃性に優れた GRC を鉄筋コンクリートカバーとして永久型枠に適用した工法で, GRC カバー内部の鋼管杭と鉄筋コンクリートを, 水中スタッド溶接で一体合成することを特徴とした防食工法.		1989年7月		バンドの発錆が更に増大した
			1991年7月		バンドが腐食で破断. GRC カバーが3箇所脱落. 内部鉄筋コンクリートが露出. モニタリング調査を開始した
			1992年7月		上から1・3・4段目の3本のバンド脱落. 露出した内部鉄筋コンクリートに異状はない
施工フロー		1994年3月	終了		
素地調整		2004年7月	現在まで放置. GRC カバーは全て脱落		
被覆材の構成図		断面形状図			
防食仕様	防食層: 鉄筋コンクリート 110mm 厚 鋼管杭との合成: 水中スタッド溶接 M16 ボルト頭付 カバー: GRC 成型板				

2004年の外観写真(海側上部)	<p>(写真-D.29 参照)</p>

表-C.30 鋼管杭 No. 18 水中硬化型ライニング工法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録		
杭径	φ700mm	1984年6月	施工	
施工面積	12.1 m ²	1986年6月	外観上特に異状はなく良好であった	
施工範囲	-0.23~+5.27	1988年7月	付着力測定を実施	
素地調整	SIS-Sa2.5		1995年8月	
工法の特徴	厳しい腐食環境下ある鋼構造物の新設や塗替えに適用する超厚膜の水中硬化型エポキシ樹脂系塗料を固定した金網を覆って塗布する工法で, 耐久性, 耐衝撃性に優れた特徴を有する防食工法.	1995年8月	全体的に良好. 一部擦り傷を確認	
		1997年7月	擦り傷跡が見られるが全体に良好状態	
		2004年7月	全般に良好な状態	
施工フロー				
素地調整				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	金網: 亜鉛メッキ金網(5メッシュ) 鋼管杭に溶接固定 防食材: ナプコバリアーN 5000 μ (超厚膜の水中硬化型エポキシ樹脂系塗料) 合計 5000 μ			

2004年の外観写真(陸側中央部)	<p>(写真-D.30 参照)</p>

表-C.31 鋼管杭 No. 19 ペトロラタムライニング+FRPP カバー工法 [PTC-N 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1984年 7月	施工.	
施工面積	12.1 m ²	1985年 11月	保護カバー接続部(陸側)の一部に錆汁確認.	
施工範囲	±0.00~+5.50			
素地調整	第3種ケレン	1988年 7月	鋼素地面の調査実施, 防食ペーストの付着良好, 鋼素地面異状なし.	
工法の特徴	ペトロラタム系防食材(粘着性・非水溶性・撥水性・揮発性・電気絶縁性に優れた性質を有する)とその防食材を保護する保護材(FRPP 製カバー)との組み合わせによる防食システム.	1993年 7月	鋼素地面の調査実施, 防食シート表面に変色あり, 鋼素地面異状なし.	
		1994年 12月	保護カバー剥離(2枚), 一部素地面露出, 赤錆発生.	
		1995年 7月	保護カバー剥離拡大(3枚), 剥離部全面に赤錆発生.	
		1996年 7月	保護カバー破損, 全面剥離.	
		1996年 7月	試験終了. PTC-AX 工法に更新.	
施工フロー				
素地調整				
ペトロラタムペースト				
ペトロラタムシート				
FRPP保護カバー取付				
FRPPカバー接続部バンド締め付け				
		被覆材の構成図	断面形状図	2004年の外観写真(陸側下部)
		防食仕様 下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムシート 上層: FRPP 保護カバー (6段) FRPP カバー接続部バンド締め付け (5箇所)		 (写真-D.31 参照)

表-C.32 鋼管杭 No. 19 ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-AX 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 700mm	1996年 7月	新規施工(PTC-AX 工法に更新). 強度・色差測定用カバー設置.	
施工面積	12.1 m ²	1997年 7月	保護カバー(海側)に茶褐色の汚れあり. 保護カバー異状なし.	
施工範囲	±0.00~+5.50			
素地調整	第3種ケレン	1998年 7月	水際付近にウレタン補修材(白色)一部露出. 保護カバー異状なし.	
工法の特徴	ペトロラタム系防食材(粘着性・非水溶性・撥水性・揮発性・電気絶縁性に優れた性質を有する)とその防食材を保護する耐衝撃性に優れたFRP 製カバーとの組み合わせによる防食システム.	1999年 8月	強度・色差測定実施(3年後), 測定用カバー一部流失. 保護カバー異状なし.	
		2002年 7月	強度・色差測定実施(6年後), 保護カバー異状なし.	
		2004年 6月	特に異状なし.	
		施工フロー		
素地調整				2004年の外観写真(陸側中間部)
ペトロラタムペースト				
ペトロラタムテープ				
FRP保護カバー取付				
強度測定用カバー取付 色差測定用カバー取付				
		被覆材の構成図	断面形状図	
		防食仕様 下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: FRP 保護カバー ×2組 強度測定用 FRP カバー ×4組 色差試験用 FRP カバー ×2組		 (写真-D.32 参照)

表-C.33 鋼管杭 No. 20 セメントモルタル/FRP カバー工法の概要と調査記録

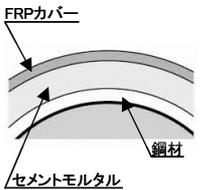
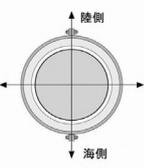
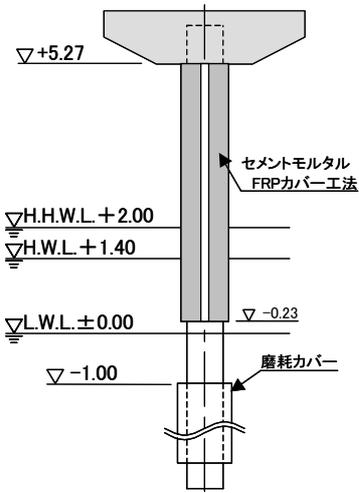
防食分類	無機ライニング	主な調査記録									
杭 径	φ700mm	1984年6月	施 工								
施工面積	12.1 m ²	1985年10月	異状は認められない								
施工範囲	-0.23~+5.27	1988年7月	剥離調査を実施。結果は良好だった。+0.7~+1.0mの約1 m ² バンド新規取付								
素地調整	第3種ケレン	1990年8月	モニタリング調査を開始した								
工法の特徴	FRP で成型された円形のカバーを鋼管杭に取付け、鋼面とカバーの間隙にセメントモルタルを充填する工法で、セメント自身が持つ強いアルカリにより鋼面に緻密な不動態被膜が形成され腐食から鋼面を保護する。そして外面に FRP カバーを併用することでモルタル厚を軽減する特徴を有する。	1992年8月	異状は認められない								
		1993年7月	異状なし。剥離試験/鋼面の観察								
		1994年7月	異状なし。カバーの「チョーキング」試験								
		1995年7月	異状は認められない								
		1997年3月	終了								
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">施工フロー</td> </tr> <tr> <td colspan="2">素地調整</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FRPカバー取付</td> </tr> <tr> <td colspan="2">モルタル注入</td> </tr> </table>				施工フロー		素地調整		FRPカバー取付		モルタル注入	
施工フロー											
素地調整											
FRPカバー取付											
モルタル注入											
被覆材の構成図		断面形状図									
											
防食仕様	防食材：セメントモルタル 25mm 厚 カバー：FRP										
											
											

表-C.34 鋼管杭 No. 20 ペトロラタムライニング+耐食アルミカバー工法の概要と調査記録

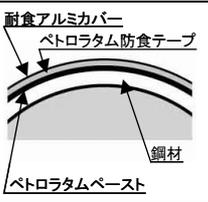
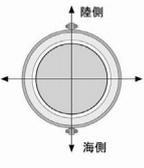
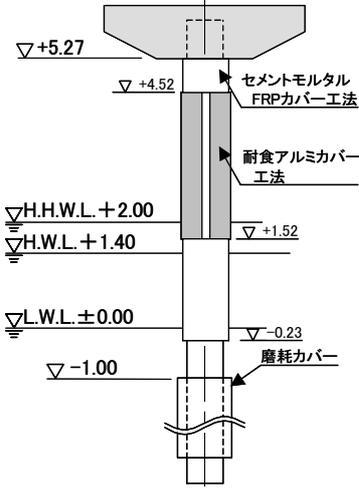
防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録											
杭 径	φ700mm	2000年8月	施 工										
施工面積	6.60 m ²	2001年7月	既存塗覆装とカバー上端部から流れ錆を確認。耐食アルミカバーに流れ錆が付着していた										
施工範囲	+1.52~+4.52	2002年8月	昨年同様の状態で他には異状がない										
素地調整	第3種ケレン	2002年9月	外観上異状は認められなかった										
工法の特徴	ペトロラタム防食工法において、特に耐食性に優れている耐食アルミカバーを保護カバーとして防食層を構成した防食工法。	2003年8月	特に外観上異状は認められなかった										
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">施工フロー</td> </tr> <tr> <td colspan="2">素地調整</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ペトロラタムペーストテープ</td> </tr> <tr> <td colspan="2">ペトロラタム防食テープ</td> </tr> <tr> <td colspan="2">耐食アルミカバー取付</td> </tr> </table>				施工フロー		素地調整		ペトロラタムペーストテープ		ペトロラタム防食テープ		耐食アルミカバー取付	
施工フロー													
素地調整													
ペトロラタムペーストテープ													
ペトロラタム防食テープ													
耐食アルミカバー取付													
被覆材の構成図		断面形状図											
													
防食仕様	下層：ペトロラタムペーストテープ 中層：ペトロラタム防食テープ カバー：耐食アルミカバー												
													
													

表-C.35 鋼管杭 No. 21 特殊ウレタン樹脂新被覆工法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	2000 年 8 月	新規施工(+1.45~+3.35)
施工面積	8.14 m ²	2002 年 7 月	一部カバー破損, 防食層異常なし
施工範囲	+1.45~+5.15	2004 年 6 月	追加施工(+3.35~+5.15)
素地調整	SIS-St2.0		
工法の特徴	弾性・耐衝撃性に優れ, 鋼材との良好な接着性を示す特殊ウレタン樹脂を防食層に用い, 保護層として FRP カバーを用いた防食工法.		
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">樹脂調合・樹脂塗布 (FRPカバーの不織布に含浸)</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">FRPカバー取付・リベット固定</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">当板取付</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様			
防食層: 不織布+特殊ウレタン樹脂 (樹脂厚 5mm)			
カバー: FRP (FRP 厚 2.5mm)			
2004 年の外観写真(海側下部)			
(写真-D.35 参照)			

表-C.36 鋼管杭 No. 21 防食テープ/FRP カバー工法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984 年 6 月	施 工
施工面積	12.1 m ²	1985 年 10 月	異状は認められない
施工範囲	-0.23~+5.27	1987 年 7 月	フランジ部パッキンに若干の欠陥
素地調整	第 3 種ケレン	1988 年 7 月	剥離調査. 異状はなかった
工法の特徴	ポリエチレンの特徴を活かし, 平板端部をラップさせ鋼管杭に巻付けて接合部を熱有着させカバーを固定装着させる工法. フランジ部がなく漂流物による影響が少ない防食工法.		
	1990 年 8 月		
	1991 年 8 月		
	1995 年 7 月		
	1996 年 8 月		
1997 年 3 月			
終了			
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">防食テープ巻き { ゴム系防食粘着材 } { ポリエチレン基材 }</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">FRPカバー取付 (裏張) 膨潤性特殊ゴムシート3mm</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様			
下層: 防食テープ (ゴム系防食粘着材ポリエチレン基材)			
上層: 膨潤性特殊ゴムシート 3mm 厚 (FRP カバーに裏張)			
カバー: FRP			
2004 年の外観写真(海側下部)			
(写真-D.36 参照)			

表一-C.37 鋼管杭 No. 21 特殊ウレタン樹脂新被覆工法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	2000年 8月	下段新規施工(既設塗覆部撤去後).
施工面積	8.1 m ²	2001年 7月	上部既設塗覆部との継ぎ目から錆汁発生. 開放点検実施(1年後).
施工範囲	+1.45~+5.15	2002年 7月	中間部から下端部にかけてカバー破損, 補修, 防食層に異常なし.
素地調整	第3種ケレン	2003年 7月	上部既設塗覆部破損, 全体に錆汁付着. 保護カバー異常なし.
工法の特徴	弾性に優れ湿潤面においても良好な接着性を示す特殊ウレタン樹脂を防食層とし, さらに保護層である FRP 製カバーと一体構造化したもの. ボルトを用いた締め付けフランジを必要としない構造になっているため, 波浪の影響を受けにくい.	2004年 7月	上段新規施工(既設塗覆部破損部撤去後).
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様	防食層: 特殊ウレタン樹脂(5mm t) + 不織布 保護層: FRP カバー(2.5mm t)		
2004年の外観写真(海側下部)			
(写真-D.37 参照)			

表一-C.38 鋼管杭 No. 22 ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-A 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年 7月	施工.
施工面積	10.8 m ²	1987年 6月	接続部バンド脱落(2ヶ所), 補修.
施工範囲	+0.60~+5.50	1988年 7月	鋼素地面の調査実施, 防食テープの付着良好, 鋼素地面異常なし.
素地調整	第3種ケレン	1990年 7月	モニタリング用センサー設置(2ヶ所). 保護カバー異常なし.
工法の特徴	ペトロラタム系防食材(粘着性・非水溶性・撥水性・揮発性・電気絶縁性に優れた性質を有する)とその防食材を保護する保護材(FRP 製カバー)との組み合わせによる防食システムと流電陽極方式を併用した防食工法.	1993年 7月	鋼素地面の調査実施, 防食テープ表面に変色あり, 鋼素地面異常なし.
		1994年 7月	上部工からの錆汁あり.
		1997年 7月	保護カバー(海側)に茶褐色の汚れあり.
		2002年 11月	全開放・調査実施(全撤去/回収).
		2002年 11月	試験終了. PTC-FL 工法に更新.
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様	下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: FRP 保護カバー × 2組 陽極: アルミニウム合金陽極 × 1個		
2004年の外観写真(海側中間部)			
(写真-D.38 参照)			

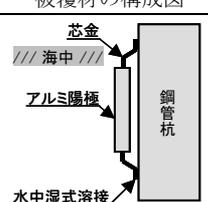
表-C.39 鋼管杭 No. 22 ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-FL 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		<p>▽+5.50 ▽H.H.W.L.+2.00 ▽H.H.W.L.+1.40 ▽L.W.L.±0.00 ▽+0.60 磨耗カバー アルミニウム合金陽極</p>
杭 径	φ700mm	2002年11月	新規施工(PTC-FL工法に更新). 質量減測定用試験片設置. ボルト試験片設置(陸側3ヶ所).	
施工面積	10.8 m ²	2004年7月	下段カバー破損, 再設置, ボルト試験片脱落(下段).	
施工範囲	+0.60~+5.50	2004年8月	保護カバー特に異状なし.	
素地調整	第3種ケレン			
工法の特徴	ペトロラタム系防食材(粘着性・非水溶性・撥水性・揮発性・電気絶縁性に優れた性質を有する)と保護材との組み合わせによる防食システムで, 保護材である FRP 製カバーのフランジ(突起部)を無くし, 波浪による耐衝撃性を強化した防食工法.			
	<p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[ペトロラタムペースト] B --> C[ペトロラタムテープ] C --> D[FRP保護カバー取付] D --> E[FRP当板取付] E --> F[陽極取付] </pre>			
		被覆材の構成図	断面形状図	2004年の外観写真(海上部の状態)
		<p>FRP保護カバー ペトロラタムテープ 鋼材 ペトロラタムペースト</p>		<p>(写真-D.39 参照)</p>
		防食仕様	下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタムテープ 上層: FRP 保護カバー × 2 組 陽極: アルミニウム合金陽極 × 1 個	

表-C.40 鋼管杭 No. 22 電気防食工法 (流電陽極方式) の概要と調査記録

防食分類	電気防食	主な調査記録		<p>▽+5.50 ▽H.H.W.L.+2.00 ▽H.H.W.L.+1.40 ▽L.W.L.±0.00 ▽+0.60 磨耗カバー アルミニウム合金陽極</p>
杭 径	φ700mm	1984年7月	施工. 電位・電流定期測定開始.	
施工面積	16.3 m ² (有効面積)	1986年6月	陽極消耗量調査実施.	
施工範囲	+0.60m以深	1988年11月	陽極取替, 電位・電流連続測定開始.	
素地調整	-	1993年7月	陽極消耗量調査実施. サンドエロージョン試験実施.	
工法の特徴	海水および海底土中にある鋼管杭よりも低い電位の金属(鉄に対してアルミニウム合金等)を陽極として被防食体に電氣的に接続し, 両者の電位差による電池作用で防食する工法.			
		1993年8月	電位・電流連続測定開始(デジタル式).	
		1994年7月	サンドエロージョン試験片回収(1年後).	
		1996年7月	陽極取替. 陽極消耗量調査実施. 磨耗カバー切り取り, 厚み測定実施.	
		2001年7月	陽極消耗量調査実施. サンドエロージョン試験片回収(8年後).	
		2002年7月	サンドエロージョン試験片回収(9年後).	
		2004年6月	陽極取替. 陽極消耗量調査実施. 磨耗カバー切り取り, 厚み測定実施.	
		被覆材の構成図	断面形状図	
		<p>芯金 アルミニウム合金陽極 鋼管杭 水中湿式溶接</p>		
		防食仕様	陽極材料: アルミニウム合金 (数量)1 個 (質量)32kg 以上 (標準発生電流)3.0A (耐用寿命)約 5年	
		施工フロー	鋼管杭取付部ケレン	
			アルミニウム合金陽極仮付け溶接	
			アルミニウム合金陽極溶接固定	

表-C.41 鋼管杭 No. 22 電気防食工法 (流電陽極方式) の概要と調査記録

防食分類	電気防食	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年7月	施 工
施工面積	17.22 m ² (有効面積)	1986年6月	電位測定, 発生電流測定, 消耗量測定
施工範囲	+0.25m 以深	1987年6月	電位-1019mV. 発生電流 0.39A 有効面積 17.22 m ² . 電流密度 22.65mA/m ²
素地調整	—		
工法の特徴	海中および海底土中部にある鋼管杭よりも低い電位の金属(鉄に対してアルミニウム合金等)を陽極として被防食体に電氣的に接続し, 両者の電位差による電池作用で防食する工法.	1988年11月	電位は変動大きく, 陰分極が大きい
		1991年11月	データロガーを用い連続測定でデータ収集. 港湾技術研究所でデータ解析を行う
		1992年8月	電位, 電流の連続測定を実施. 海象条件との相関について考察を試みた
		1993年7月	残寿命 4.69/yr. 消耗率 3.41kg/yr. 発生電流 1.01A.
施工フロー		1996年8月	漂砂の影響による腐食量調査(サンドエロージョン試験)を実施. 防食効果を調査. 陽極寿命5年と交換
		被覆材の構成図	断面形状図
			
防食仕様		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 (耐用寿命)約5年 5年寿命に交換(1996年)	

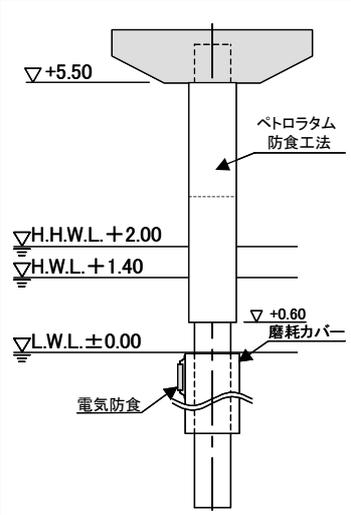
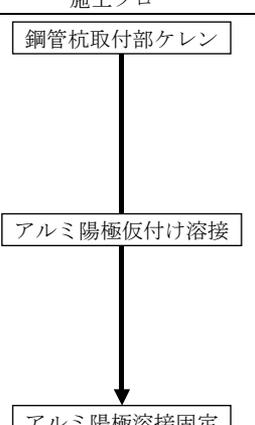
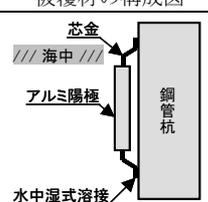


表-C.42 鋼管杭 No. 23 電気防食工法 (流電陽極方式) の概要と調査記録

防食分類	電気防食	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1984年7月	施 工
施工面積	18.68 m ² (有効面積)	1986年6月	電位測定, 発生電流測定, 消耗量測定
施工範囲	+0.89m 以深	1987年6月	電位-846mV. 発生電流 1.27A 有効面積 20.04 m ² . 電流密度 63.37mA/m ²
素地調整	—		
工法の特徴	海中および海底土中部にある鋼管杭よりも低い電位の金属(鉄に対してアルミニウム合金等)を陽極として被防食体に電氣的に接続し, 両者の電位差による電池作用で防食する工法.	1988年11月	電流値が小さく当初から変わらない
		1991年11月	データロガーを用い連続測定でデータ収集. データ解析を行う
		1992年8月	電位, 電流の連続測定を実施. 海象条件との相関について考察を試みた
		1993年7月	残寿命 2.00/yr. 消耗率 4.78kg/yr. 発生電流 1.27A. 埋設 1/2. (15年に交換)
施工フロー		1996年8月	サンドエロージョン試験と定電位法による陰極試験を実施. 電気防食効果を調査
		被覆材の構成図	断面形状図
			
防食仕様		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 (耐用寿命)約5年 15年寿命に交換(1993年)	

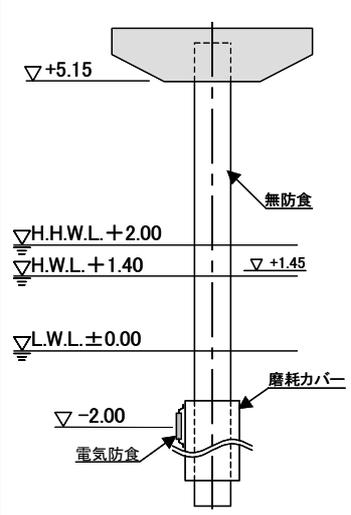


表-C.43 鋼管杭 No. 24 ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A法)] の概要と調査記録

防食分類		ペトロラタムライニング		主な調査記録	
杭径	φ700mm	1985年7月	施工		
施工面積	12.7㎡	1989年6月	良好な状態を保っている		
施工範囲	-0.63~+5.15	1990年8月	特に異状は認められない		
素地調整	第3種ケレン	1991年8月	上端部シールパテからペースト流出確認		
工法の特徴	一体成型防食体(A法)は、成型されたFRPカバーの保護層と緩衝層および防食層から構成された防食工法で、あらかじめ工場一体に成型されたものを鋼管杭に取り付けて防食する工法。	1996年7月	特に異状は認められない		
		1997年6月	接続バンドに錆が見られたが、良好		
		2001年7月	接続バンドに錆が見られるが、良好		
		2003年7月	ペーストの漏れによる汚れの面積が増加している。海側は多く陸側は少ない		
施工フロー					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体(A法) 工場製作</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体(A法)の取付</div> </div>					
被覆材の構成図		断面形状図			
防食仕様		防食層：ペトロラタムシート 2.5kg/㎡ 緩衝層：発泡ウレタンシート 5mm厚 保護層：成型FRP半割りフランジタイプカバー			
2004年の外観写真(海側中間部)					
<p>(写真-D.40 参照)</p>					

表-C.44 鋼管杭 No. 25 ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A法)] の概要と調査記録

防食分類		ペトロラタムライニング		主な調査記録	
杭径	φ800mm	1985年7月	施工		
施工面積	16.1㎡	1986年6月	上端部から錆汁流出。良好な状態		
施工範囲	-1.22~+5.15	1987年7月	上端部固定金具の一部から僅かな発錆		
素地調整	第3種ケレン	1988年6月	特に異状なし		
工法の特徴	一体成型防食体(A法)は、成型されたFRPカバーの保護層と緩衝層および防食層から構成された防食工法で、あらかじめ工場一体に成型されたものを鋼管杭に取り付けて防食する工法。	1996年7月	特に異状は認められない		
		1997年6月	接続バンドに錆が見られ、端部パテの剥離があったが、特に異状は無い		
		2002年7月	同上の状態であるが特に異状は無い		
		2003年7月	開放点検で本工法を全部撤去し耐久性試験を実施。工法を更新した新工法は「チタンカバー工法(TP-W工法)」		
施工フロー					
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体(A法) 工場製作</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">素地調整</div> <div style="font-size: 2em;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">一体成型防食体(A法)の取付</div> </div>					
被覆材の構成図		断面形状図			
防食仕様		防食層：ペトロラタムシート 2.5kg/㎡ 緩衝層：発泡ウレタンシート 5mm厚 保護層：成型FRP半割りフランジタイプカバー			
2003年の耐久性試験時外観写真					
<p>(写真-D.41 参照)</p>					

表-C.45 鋼管杭 No. 25 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP-W 工法] の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 800mm	2003 年 7 月	施 工	
施工面積	16.1 m ²	2004 年	異状なし	
施工範囲	-1.25~+5.15			
素地調整	第 3 種ケレン			
工法の特徴	チタンカバー工法 (TP-W 工法) は、ペトロラタムライニング防食法に耐食性金属として優れたチタンシートを保護カバーとして用いた工法で、超長期防食性能を発揮することを考慮した防食工法。			
施工フロー				
<pre> graph TD A[素地調整] --> B[ペトロラタムテープ巻き] B --> C[防食テープ巻き] C --> D[チタンカバー溶接取付] D --> E[端部シール] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	下層：ペトロラタムテープ 中層：防食テープ 保護層：チタンカバー (溶接取付) 端部：シール材 (エポキシ系樹脂パテ)			

表-C.46 鋼管杭 No. 26 電気防食工法 (流電陽極方式) の概要と調査記録

防食分類	電気防食	主な調査記録		
杭 径	φ 800mm	1984 年 6 月	施 工	
施工面積	22.50 m ² (有効面積)	1986 年 6 月	電位測定, 発生電流測定, 消耗量測定	
施工範囲	+0.89m 以深	1987 年 6 月	電位 -9.87mV, 発生電流 0.37A 有効面積 20.26m ² , 電流密度 47.88mA/m ²	
素地調整	-			
工法の特徴	海中および海底土中部にある鋼管杭よりも低い電位の金属 (鉄に対してアルミニウム合金等) を陽極として被防食体に電氣的に接続し、両者の電位差による電池作用で防食する工法。			
施工フロー				
<pre> graph TD A[鋼管杭取付部ケレン] --> B[アルミ陽極仮付け溶接] B --> C[アルミ陽極溶接固定] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	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 (耐用寿命) 約 5 年 5 年寿命に交換 (2001 年)			

表-C.47 鋼管杭 No. 27 極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)の概要と調査記録

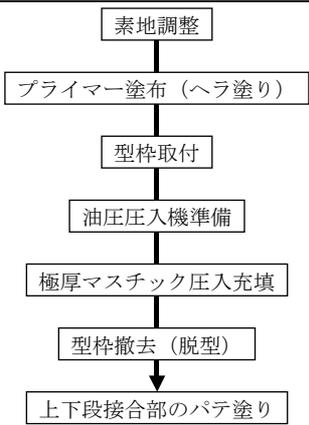
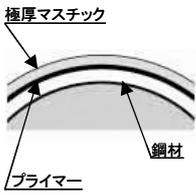
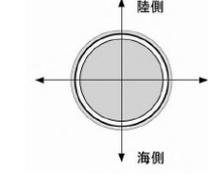
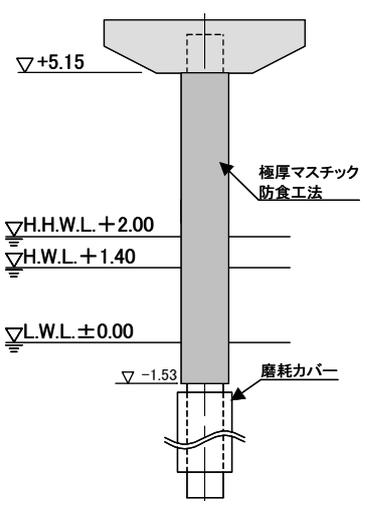
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年8月	施 工
施工面積	16.80 m ²	1985年10月	上端部より錆汁が認められたが良好
施工範囲	-1.53~+5.15	1987年6月	上下段の接合パテ充填部から点錆および錆汁が認められた。パテの充填が不足していたので補修を行った
素地調整	第2種ケレン(電動工具)	1988年8月	補修部も良好な状態を確認した
工法の特徴	素地調整後、プライマーを塗布し、直ちに鋼管杭に FRP 製の型枠を取付けて、この型枠の下部注入口からエポキシ樹脂をポンプを用いて圧注し、樹脂硬化後、型枠を外して極厚の被覆層を成型する施工法。	1990年8月	モニタリング用測定端子設置
		1993年8月	塗膜は全体的に白亜化が進むが良好
		1995年8月	水中部の塗膜密着状況調査実施。塗膜の密着状態は良好、鋼面観察より防食状態良好
		1998年7月	1995年調査箇所での補修材が剥離。補修
		2002年1月	1995年調査箇所での補修部で剥離脱落するため、アルミニウム合金陽極を取付
施工フロー		2001年10月	補修部の塗膜が再度剥離脱落
		被覆材の構成図	断面形状図
			
防食仕様		上層：EP-MX1000 プライマー 上層：EP-MX1000 10mm厚以上	
			
2004年の外観写真(海側上部)			
			
(写真-D.43 参照)			

表-C.48 鋼管杭 No. 28 極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)の概要と調査記録

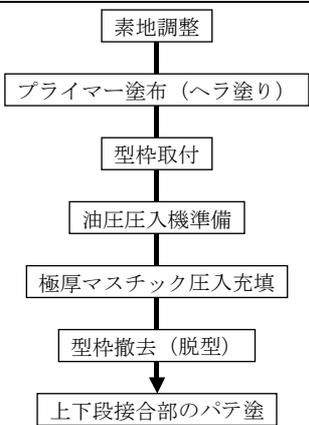
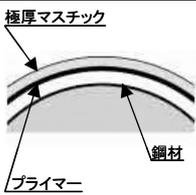
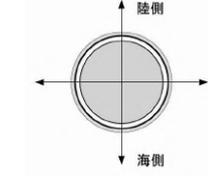
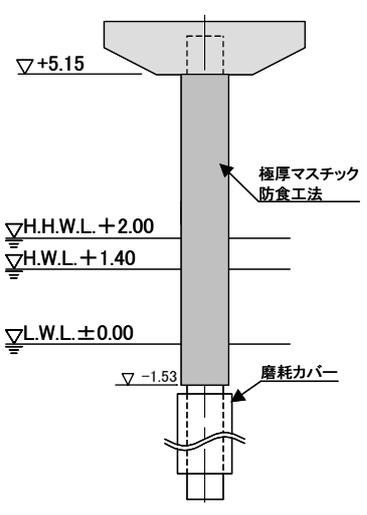
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年8月	施 工
施工面積	16.80 m ²	1985年10月	上端部より錆汁が認められたが良好
施工範囲	-1.53~+5.15	1987年6月	上下段の接合パテ充填部から点錆および錆汁が認められた。パテの充填が不足していたので補修を行った
素地調整	第2種ケレン(電動工具)	1988年8月	補修部も良好な状態を確認した
工法の特徴	素地調整後、プライマーを塗布し、直ちに鋼管杭に FRP 製の型枠を取付けて、この型枠の下部注入口からエポキシ樹脂をポンプを用いて圧注し、樹脂硬化後、型枠を外して極厚の被覆層を成型する施工法。	1990年8月	補修部も良好な状態を確認した
		1993年8月	-0.24mで剥離観察を実施。良好
		1995年8月	水中部の塗膜密着状況調査実施。塗膜の密着状態および防食状態良好
		1998年7月	1995年調査箇所での補修材が剥離し補修
		2003年7月	1995年調査箇所での補修部が、繰り返し剥離脱落するため、同部をペトロラタムライニング工法にて補修
施工フロー		2003年7月	1995年調査箇所での補修部が、繰り返し剥離脱落するため、同部をペトロラタムライニング工法にて補修
		被覆材の構成図	断面形状図
			
防食仕様		上層：EP-MX1000 プライマー 上層：EP-MX1000 10mm厚以上	
			
2004年の外観写真(海側上部)			
			
(写真-D.44 参照)			

表-C.49 鋼管杭 No. 29 CRUS 工法(補強と防食を併せ持つ工法)の概要と調査記録

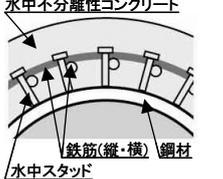
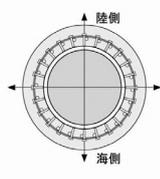
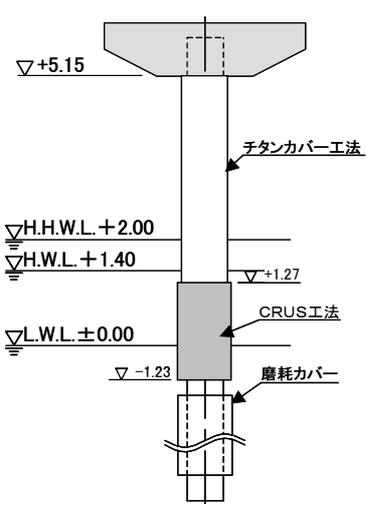
防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年 8月	施 工
施工面積	6.30 m ²	1986年 6月	良好な状態を維持していた
施工範囲	-1.23~+1.27	1987年 7月	良好な状態を維持していた
素地調整	第3種ケレン	1991年 7月	端子を埋め込み、モニタリングを開始した
工法の特徴	港湾鋼構造物で腐食により肉厚減少や穴明きが発生した場合、有効肉厚がある上部と下部に水中スタッド溶接でスタッドジベルを溶接し、縦横の鉄筋を組立、型枠を設置して水中不分離性コンクリートを打設する工法で、強度を復元させ防食効果も併せ持つ補強・防食工法。	1998年 7月	ひび割れ部を全部取り除き新たに補修
		1999年 8月	補修箇所も良好な状態を維持していた
		2003年 8月	補修箇所も良好な状態を維持していた
		2004年 8月	コンクリートコアを採取し各種試験を実施
		2005年 8月	コンクリートコアを採取し各種試験を実施
施工フロー			
<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">水中スタッド溶接</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">鉄筋組立(縦・横)</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">円形型枠の取付</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">水中不分離性コンクリート打設</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">硬化後の型枠撤去(養生7日)</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様		ジベル筋: M16 ねじ付き水中スタッド溶接取付 鉄筋: 縦筋 D25 L2200mm×25本 横筋 D10 L1900mm×16本 水中不分離コンクリート: W/C50% 150mm厚	
 <p>2004年の外観写真(海側接続部)</p>			
 <p>(写真-D.45 参照)</p>			

表-C.50 鋼管杭 No. 29 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP 工法] の概要と調査記録

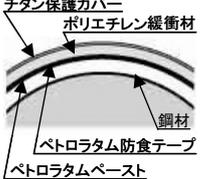
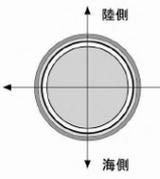
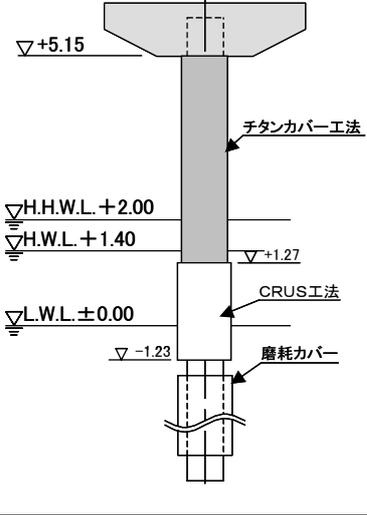
防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1997年 5月	無防食
施工面積	9.75 m ²	1997年 6月	施 工
施工範囲	+1.27~+5.15	1998年 7月	海側面に波力でチタンカバーにシワが発生。ペーストの汚れがあった。
素地調整	第3種ケレン	1999年 7月	チタンカバー2段目が剥落。海側面に打痕。シワが多く見られたので、新しい仕様に変更し更新工事を行った
工法の特徴	ペトロラタム防食工法において、特に耐食性が優れているチタン(薄板)を保護カバーとして適用し、超長期防食対策用とする防食工法。	2000年 7月	特に異状は認められない。良好だった
		2002年 7月	特に異状は認められない。良好だった
		2003年 7月	良好な状態を維持している
施工フロー			
上部300mm <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">素地調整</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ペトロラタムペースト</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ペトロラタム防食テープ</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">ポリエチレン製緩衝材付きチタン製保護カバー取付</div> <div style="margin: 5px 0;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">カバー上端隙間部エポキシ樹脂充填</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様		下層: ペトロラタムペースト 中層: ペトロラタム防食テープ 上層: チタン製保護カバー(薄板) カバー上端隙間部エポキシ樹脂充填(シール)	
 <p>2004年の外観写真(陸側中間部)</p>			
 <p>(写真-D.46 参照)</p>			

表-C.51 鋼管杭 No. 30 電気防食工法（流電陽極方式）の概要と調査記録

防食分類		電気防食		主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	施 工		
施工面積	22.34 m ² (有効面積)	1986年 6月	電位測定, 発生電流測定, 消耗量測定		
施工範囲	+0.89 以深	1987年 6月	電位-851mV, 発生電流 1.06A 有効面積 21.81 m ² , 電流密度 48.6mA/m ²		
素地調整	—				
工法の特徴	海中および海底土中部にある鋼管杭よりも低い電位の金属(鉄に対してアルミニウム合金等)を陽極として被防食体に電氣的に接続し, 両者の電位差による電池作用で防食する工法.	1988年 11月	電流値が小さく当初から変わらない		
		1991年 7月	データロガーを用い連続測定でデータ収集, 港湾技術研究所でデータ解析を行う		
		1992年 8月	電位, 電流の連続測定を実施. 海象条件との相関について考察を試みた		
		1993年 7月	陽極残存量ゼロとなっていた. 消耗率 7.6kg/yr, 発生電流 1.60A. 15年に交換		
施工フロー		1996年 8月	漂砂の影響による腐食量調査(サンドエロージョン試験)を実施. 効果を調査		
		被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様		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 (耐用寿命) 約 5年 15年寿命に交換(1993年)			

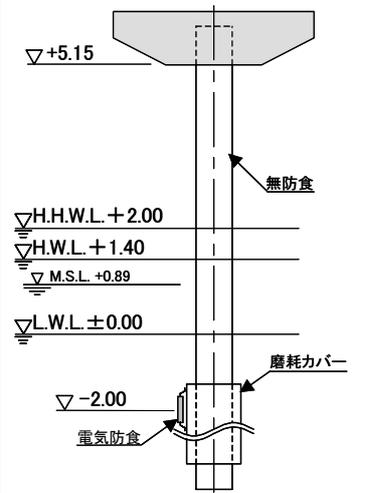
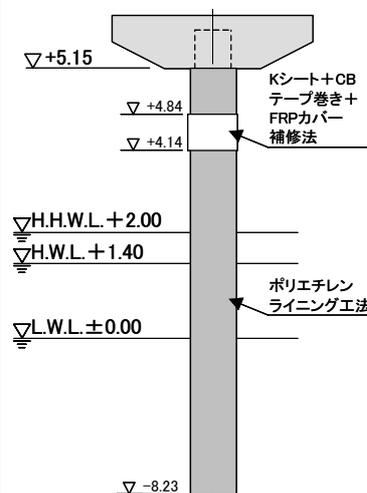


表-C.52 鋼管杭 No. 31 ポリエチレンライニング工法の概要と調査記録

防食分類		有機ライニング		主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	施 工		
施工面積	33.62 m ²	1985年 6月	特に異状は認められない		
施工範囲	-8.23~+5.15	1990年 8月	特に異状は認められない		
素地調整	ショットブラスト第3種℄	1999年 7月	特に異状は認められない		
工法の特徴	耐海水性, 耐候性, 耐薬品性に優れ, 工場一貫製造により高い品質管理で防食対策を施した長期耐久性に優れた防食工法. また, 容易な現場施工も可能となる防食工法.	2000年 7月	特に異状は認められない		
施工フロー					
		被覆材の構成図		断面形状図	
防食仕様		素地調整: ショットブラスト 被覆材: ポリエチレン 施工方法: Tダイ方式			



2004年の外観写真(海側上部)



(写真-D.47 参照)

表-C.53 鋼管杭 No. 32 ポリエチレンライニング工法の概要と調査記録

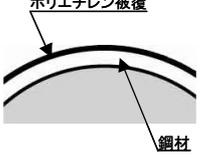
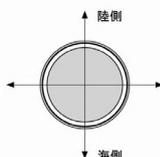
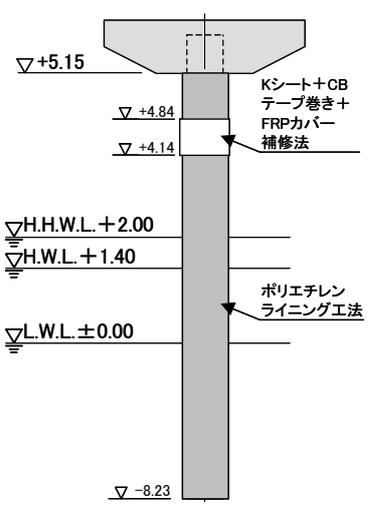
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年6月	施 工
施工面積	33.62 m ²	1985年6月	特に異状は認められない
施工範囲	-8.23~+5.15	1990年8月	特に異状は認められない
素地調整	ショットブラスト第3種ケル	1999年7月	特に異状は認められない
工 法 の 特 徴	耐海水性、耐候性、耐薬品性に優れ、工場一貫製造により高い品質管理で防食対策を施した長期耐久性に優れた防食工法。また、容易な現場施工も可能となる防食工法。	2003年7月	特に異状は認められない
施工フロー			
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">鋼管杭の製造</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">素地調整</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ポリエチレン被覆施工</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">品質管理</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">現地出荷</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様		素地調整：ショットブラスト 被覆材：ポリエチレン 施工方法：Tダイ方式	
			
2004年の外観写真(陸側上部)			
			
(写真-D.48 参照)			

表-C.54 鋼管杭 No. 33 ポリエチレンライニング工法の概要と調査記録

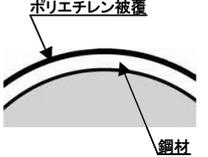
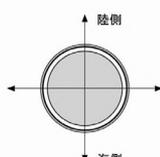
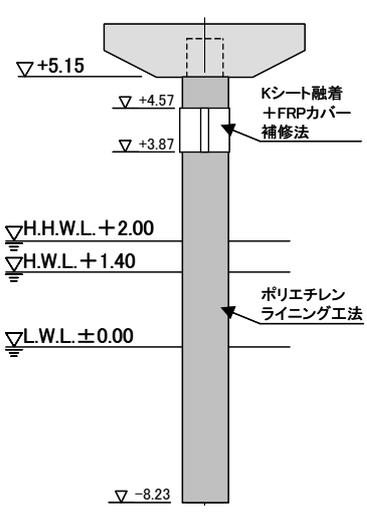
防食分類	有機ライニング	主な調査記録	
杭 径	φ 800mm	1984年6月	施 工
施工面積	33.88 m ²	1985年6月	特に異状は認められない
施工範囲	-8.23~+5.15	1990年8月	特に異状は認められない
素地調整	ショットブラスト第3種ケル	1999年7月	特に異状は認められない
工 法 の 特 徴	耐海水性、耐候性、耐薬品性に優れ、工場一貫製造により高い品質管理で防食対策を施した長期耐久性に優れた防食工法。また、容易な現場施工も可能となる防食工法。	2003年7月	特に異状は認められない
施工フロー			
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">鋼管杭の製造</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">素地調整</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ポリエチレン被覆施工</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">品質管理</div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: black; margin: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">現地出荷</div> </div>			
被覆材の構成図		断面形状図	
			
防食仕様		素地調整：ショットブラスト 被覆材：ポリエチレン 施工方法：Tダイ方式	
			
2004年の外観写真(陸側上部)			
			
(写真-D.49 参照)			

表-C.55 鋼管杭 No. 34 ポリエチレンライニング工法の概要と調査記録

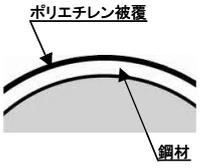
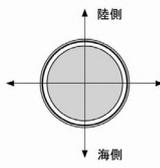
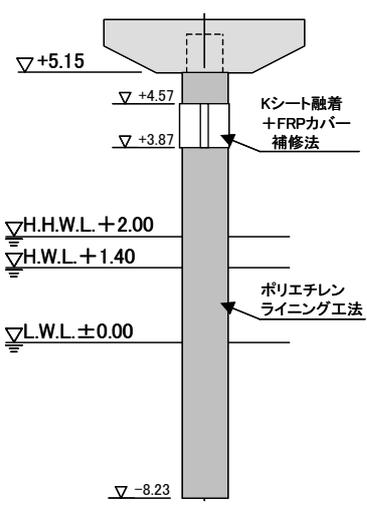
防食分類		有機ライニング		主な調査記録	
杭径	φ800mm	1984年6月	施工		
施工面積	33.9 m ²	1985年6月	特に異状は認められない		
施工範囲	-8.23~+5.15	1990年8月	特に異状は認められない		
素地調整	ショットブラスト第3種ケ	1991年8月	浮遊物による小さな傷を確認した		
工法の特徴	耐海水性、耐候性、耐薬品性に優れ、工場一貫製造により高い品質管理で防食対策を施した長期耐久性に優れた防食工法。また、容易な現場施工も可能となる防食工法。	1993年8月	10年目としてサンプル採取。補修した		
		1999年7月	特に異状は認められない		
		2003年7月	特に異状は認められない		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[鋼管杭の製造] --> B[素地調整] B --> C[ポリエチレン被覆施工] C --> D[品質管理] D --> E[現地出荷] </pre> </div> <div style="width: 45%;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div>					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>防食仕様</p> <p>素地調整：ショットブラスト 被覆材：ポリエチレン 施工方法：Tダイ方式</p> </div> <div style="width: 45%;">  <p>2004年の外観写真(海側上部)</p>  <p>(写真-D.50 参照)</p> </div> </div>					

表-C.56 鋼管杭 No. 35 ポリエチレンライニング工法の概要と調査記録

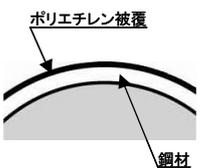
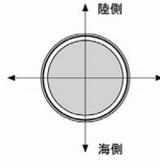
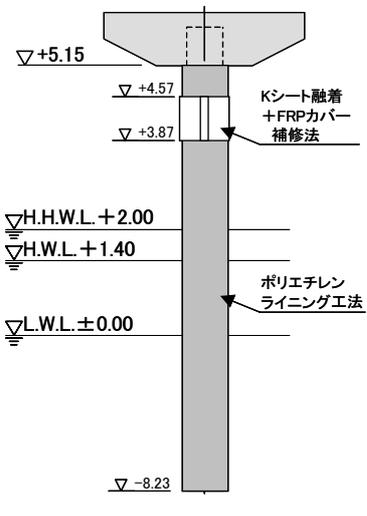
防食分類		有機ライニング		主な調査記録	
杭径	φ800mm	1984年6月	施工		
施工面積	33.88 m ²	1985年6月	特に異状は認められない		
施工範囲	-8.23~+5.15	1990年8月	特に異状は認められない		
素地調整	ショットブラスト第3種ケ	1991年8月	海側+5mから 30×30cmの大きさの被膜をサンプリングして、パテにて補修		
工法の特徴	耐海水性、耐候性、耐薬品性に優れ、工場一貫製造により高い品質管理で防食対策を施した長期耐久性に優れた防食工法。また、容易な現場施工も可能となる防食工法。	1993年8月	サンプリング補修箇所部分的にFRPで再補修した		
		1999年7月	特に異状は認められない		
		2003年7月	特に異状は認められない		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[鋼管杭の製造] --> B[素地調整] B --> C[ポリエチレン被覆施工] C --> D[品質管理] D --> E[現地出荷] </pre> </div> <div style="width: 45%;"> <p>被覆材の構成図</p>  <p>断面形状図</p>  </div> </div>					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>防食仕様</p> <p>素地調整：ショットブラスト 被覆材：ポリエチレン 施工方法：Tダイ方式</p> </div> <div style="width: 45%;">  <p>2004年の外観写真(海側上部)</p>  <p>(写真-D.51 参照)</p> </div> </div>					

表-C.57 鋼管杭 No. 31' K シート+CB テープ巻き+FRP カバー補修法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録							
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	熱収縮スリーブ法にて補修						
施工面積	1.75 m ²	1985年 7月	溶着不良のため K シート+CB テープ巻き						
施工範囲	+4.14~+4.84								
素地調整	ショットブラスト第3種ケル	1986年 6月	溶着不良のため下部 PE パントにて固定						
工法の特徴	鋼表面を清掃した後、ポリエチレンフィルムの片面に瀝青系接着剤を貼り合わせた K シートを貼り付け、ポリエチレンフィルムの片面に合成ゴム系粘着材を貼り合わせた CB テープをハーフラップにて巻き付け、FRP カバーを装着する補修法	1987年 7月	溶着不良のため FRP カバー装着						
		1990年 8月	特に異状は認められない						
		1999年 7月	特に異状は認められない						
		2001年 7月	補修箇所 で FRP 樹脂のチョーキングに因るガラス繊維露出が見られるが、特に異状は無く良好						
		2002年 7月	特に異状は認められない						
施工フロー		2003年 7月	特に異状は認められない						
		<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> 防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm </td> </tr> </table>		被覆材の構成図	断面形状図			防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm	
被覆材の構成図	断面形状図								
防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm									
2004年の外観写真(海側)									
<p>(写真-D.52 参照)</p>									

表-C.58 鋼管杭 No. 32' K シート+CB テープ巻き+FRP カバー補修法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録							
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	熱収縮スリーブ法にて補修						
施工面積	1.75 m ²	1985年 7月	溶着不良のため K シート+CB テープ巻き						
施工範囲	+4.14~+4.84								
素地調整	ショットブラスト第3種ケル	1986年 6月	溶着不良のため下部 PE パントにて固定						
工法の特徴	鋼表面を清掃した後、ポリエチレンフィルムの片面に瀝青系接着剤を貼り合わせた K シートを貼り付け、ポリエチレンフィルムの片面に合成ゴム系粘着材を貼り合わせた CB テープをハーフラップにて巻き付け、FRP カバーを装着する補修法	1987年 7月	溶着不良のため FRP カバー装着						
		1990年 8月	特に異状は認められない						
		1999年 7月	特に異状は認められない						
		2001年 7月	補修箇所 でポリエチレン樹脂のチョーキングに因るガラス繊維露出が見られるが、特に異状は無く良好						
		2002年 7月	特に異状は認められない						
施工フロー		2003年 7月	特に異状は認められない						
		<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> 防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm </td> </tr> </table>		被覆材の構成図	断面形状図			防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm	
被覆材の構成図	断面形状図								
防食仕様 防食層：K シート（ラプコシート K）2.5mm CB テープ 1mm 保護層：FRP カバー 3mm									
2004年の外観写真(海側)									
<p>(写真-D.53 参照)</p>									

表-C.59 鋼管杭 No. 33' Kシート融着+FRPカバー補修法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録		
杭径	φ800mm	1984年6月	熱収縮スリーブ法にて補修	
施工面積	1.75㎡	1985年7月	溶着不良のためKシート融着	
施工範囲	+3.87~+4.57	1986年6月	溶着不良のため下部PEバンドにて固定	
素地調整	有機ライニング			
工法の特徴	鋼表面を清掃した後、ポリエチレンフィルムの片面に瀝青系接着剤を貼り合わせたKシートを貼り付け、ラップ部をガスバーナーで熱して融着させ、FRPカバーを装着する補修法	1987年7月	溶着不良のためFRPカバー装着	
		1990年8月	特に異状は認められない	
		1992年8月	FRP保護カバー下端部剥離	
		1994年7月	FRPカバー剥落部から錆汁を確認	
		1995年8月	状態に変化は無い	
		1999年7月	状態に変化は無い	
施工フロー		2002年7月	状態に変化は無い	
		2003年7月	ペトロラタムライニング工法により補修	
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	防食層：Kシート（ラプロシートK）2.5mm 保護層：FRPカバー 3mm 施工器具：プロパンガスバーナー			

表-C.60 鋼管杭 No. 33' ペトロラタムライニング工法(FRPカバー法)の概要と調査記録

防食分類	ペトロラタムライニング	主な調査記録		
杭径	φ800mm	2003年7月	施工	
施工面積	1.75㎡			
施工範囲	+3.87~+4.57			
素地調整	第3種ケレン			
工法の特徴	補修試験箇所での既設カバー（シーリングチューブ+FRPカバー）が破損したため、ペトロラタムライニング工法で補修した。			
施工フロー				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様	下層：ペトロラタムペースト 中層：ペトロラタムシート 上層：FRP保護カバー 端部：シーリング材（エポキシ樹脂）			

表-C.61 鋼管杭 No. 34' Kシート融着+FRPカバー補修法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	熱収縮スリーブ法にて補修	
施工面積	1.75 m ²	1985年 7月	溶着不良のためKシート融着	
施工範囲	+3.87~+4.57	1986年 6月	溶着不良のため下部PEバンドにて固定	
素地調整	第3種ケレン			
工法の特徴	鋼表面を清掃した後、ポリエチレンフィルムの片面に瀝青系接着剤を貼り合わせたKシートを貼り付け、ラップ部をガスバーナーで熱して融着させ、FRPカバーを装着する補修法	1987年 7月	溶着不良のためFRPカバー装着	
		1990年 8月	特に異状は認められない	
		1999年 7月	特に異状は認められない	
		2001年 7月	補修箇所にてポリエチレン樹脂のチョーキングに因るガラス繊維露出が見られるが、特に異状は無く良好	
		2002年 7月	特に異状は認められない	
		2003年 7月	特に異状は認められない	
施工フロー				
<pre> graph TD A[素地調整] --> B[Kシート貼り付け] B --> C[ガスバーナーで熱融着] C --> D[FRPカバー装着] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様		防食仕様		
		防食層：Kシート（ラプロシートK）2.5mm 保護層：FRPカバー 3mm 施工器具：プロパンガスバーナー		
				2004年の外観写真(海側中間部)
				(写真-D.56 参照)

表-C.62 鋼管杭 No. 35' Kシート融着+FRPカバー補修法の概要と調査記録

防食分類	有機ライニング	主な調査記録		
杭 径	φ 800mm	1984年 6月	熱収縮スリーブ法にて補修	
施工面積	1.75 m ²	1985年 7月	溶着不良のためKシート融着	
施工範囲	+3.87~+4.57	1986年 6月	溶着不良のため下部PEバンドにて固定	
素地調整	ショットブラスト第3種ケレン			
工法の特徴	鋼表面を清掃した後、ポリエチレンフィルムの片面に瀝青系接着剤を貼り合わせたKシートを貼り付け、ラップ部をガスバーナーで熱して融着させ、FRPカバーを装着する補修法	1987年 7月	溶着不良のためFRPカバー装着	
		1990年 8月	特に異状は認められない	
		1999年 7月	特に異状は認められない	
		2001年 7月	補修箇所にてポリエチレン樹脂のチョーキングに因るガラス繊維露出が見られるが、特に異状は無く良好	
		2002年 7月	特に異状は認められない	
		2003年 7月	特に異状は認められない	
施工フロー				
<pre> graph TD A[素地調整] --> B[Kシート貼り付け] B --> C[ガスバーナーで熱融着] C --> D[FRPカバー装着] </pre>				
被覆材の構成図		断面形状図		
防食仕様		防食仕様		
		防食層：Kシート（ラプロシートK）2.5mm 保護層：FRPカバー 3mm 施工器具：プロパンガスバーナー		
				2004年の外観写真(海側)
				(写真-D.57 参照)

表-C.63 鋼管杭 No. K1 ガラスフレークポリエステル樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類		塗 装		主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年12月	施 工		
施工面積	8.22 m ²	1986年6月	異状は認められない。施工跡の塗装不足が原因で錆汁の流出を確認した		
施工範囲	+2.38~+6.12	1988年7月	コンクリートとの接合部で1箇所塗膜の割れと錆の流出が認められた		
素地調整	SIS—Sa2.5	1989年8月	塗膜の割れ部の錆汁が進行していた。上端から1m近辺の溶接線に1箇所点錆が発生。その他は異常なし		
工法の特徴		1990年9月	溶接線の点錆も進行していた。		
		1993年7月	塗膜の剥離試験。鋼の素地面は黒色化		
		1994年7月	全体的には良好であるが、磨耗カバーとの接触部クラックが発生。発錆を確認		
		1997年8月	錆汁痕の面積が拡大。上部コンクリート接合部の割れ、剥離が拡大している		
		2000年3月	終了		
			被覆材の構成図	断面形状図	
施工フロー 					
		防食仕様	1層：炭素鋼 1678 500μ 2層：炭素鋼 1678 500μ 合計 1000μ	2004年の外観写真(海側上部) (写真-D.58 参照)	

表-C.64 鋼管杭 No. K2 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類		塗 装		主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工		
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	特に異状は認められない		
施工範囲	+2.52~+6.12	1989年7月	特に異状は認められない		
素地調整	SIS—Sa2.5	1992年7月	磨耗カバー部に錆確認。他異状なし		
工法の特徴	著しい腐食環境下にある鋼構造物の新設や塗替えに適用するエポキシ樹脂系塗料を、ジンクプライマーを塗装した後にコテ、ハケ、ローラーでミリ単位の厚塗り施工する工法で、耐久性、耐衝撃性に優れた特長を有する防食工法	1994年7月	海側上部に点錆が1箇所発生。		
		1995年8月	海側上部コンクリート接合端部に錆の発生を確認。全般的には良好		
		1998年7月	全体的には良好な防食状態が保たれているが接合端部の錆がある。		
		2004年7月	上部コンクリート取り合い部に錆の発生があるものの、全般的には良好な状態		
施工フロー					
素地調整 		被覆材の構成図	断面形状図		
		防食仕様	1層：SD ジンクプライマーZE100 20μ 2層：ナブコバリアー2M 1000μ 3層：同上 1000μ 合計 2020μ	2004年の外観写真(海側上部) (写真-D.59 参照)	

表-C.65 鋼管杭 No. K3 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録													
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工												
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	特に異状は認められない												
施工範囲	+2.52~+6.12	1989年7月	杭中央部の溶接線とその近傍に各1箇所点錆を確認。補修塗装を行った												
素地調整	SIS—Sa2.5	1992年7月	陸側上部に錆の発生を確認。他良好												
工 法 の 特 徴	著しい腐食環境下にある鋼構造物の新設や、塗替えに適用するエポキシ樹脂系塗料を、ジンクプライマーを塗装した後、コテ、ハケ、ローラーでミリ単位の厚塗りで施工する工法で、耐久性、耐衝撃性に優れた特長を有する防食工法	1994年7月	陸側、海側上部に錆確認。他良好												
		1996年7月	陸側、海側上部に錆確認。他良好												
		1998年7月	陸側、海側上部に錆確認。他良好												
		2004年7月	上部コンクリート取り合い部と施工の不具合部に錆の発生があるものの、全般的には良好な状態												
		施工フロー													
		<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>防食仕様</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1層：SD ジンクプライマーZE100 20μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2層：ナブコバリアー5M 2000μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計 2020μ</td> </tr> </table>		被覆材の構成図	断面形状図			防食仕様		1層：SD ジンクプライマーZE100 20μ		2層：ナブコバリアー5M 2000μ			合計 2020μ
被覆材の構成図	断面形状図														
防食仕様															
1層：SD ジンクプライマーZE100 20μ															
2層：ナブコバリアー5M 2000μ															
	合計 2020μ														
				2004年の外観写真(海側上部)											
				<p>(写真-D.60 参照)</p>											

表-C.66 鋼管杭 No. K4 ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録																	
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工																
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	全体的に良好。溶接痕に僅かな錆確認																
施工範囲	+2.52~+6.12	1987年7月	前年と同様に良好であった																
素地調整	SIS—Sa2.5	1989年6月	上部コンクリート接合端部に錆汁確認																
工 法 の 特 徴		1993年7月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認																
		1994年7月	前年と同様では良好																
		1996年7月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認																
		1998年7月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認																
		2000年3月	終了																
		施工フロー																	
				<table border="1"> <tr> <td>被覆材の構成図</td> <td>断面形状図</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>防食仕様</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1層：ニッペジンキー8000 15μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2層：インターガードガラスフレーク 300μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3層：同上 300μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4層：同上 300μ</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計 915μ</td> </tr> </table>		被覆材の構成図	断面形状図			防食仕様		1層：ニッペジンキー8000 15μ		2層：インターガードガラスフレーク 300μ		3層：同上 300μ		4層：同上 300μ	
被覆材の構成図	断面形状図																		
防食仕様																			
1層：ニッペジンキー8000 15μ																			
2層：インターガードガラスフレーク 300μ																			
3層：同上 300μ																			
4層：同上 300μ																			
	合計 915μ																		
				2004年の外観写真(陸側上部)															
				<p>(写真-D.61 参照)</p>															

表-C.67 鋼管杭 No. K5 厚膜型無機ジンク/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録																
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工															
施工面積	8.24 m ²	1986年6月	施工痕に僅かな発錆確認。上部コンクリート接合端部から錆汁が認められた															
施工範囲	+2.37~+6.12																	
素地調整	SIS—Sa2.5																	
工法の特徴		1987年7月	同様な状態であるが、他は良好															
		1989年7月	施工痕の発錆4箇所を補修した															
		1990年7月	退色は認められたが塗膜は異常ない															
		1991年7月	昨年同様。インピーダンス測定を開始															
		1993年7月	磨耗カバーとの接合部に点錆数点確認															
		1994年7月	昨年同様。退色、つや引けを確認															
		1995年7月	約1mの高さまで砂の飛来による塗膜の磨耗を確認。下方に下がる程大きい															
		1996年3月	終了															
施工フロー		被覆材の構成図	断面形状図															
		<table border="1"> <tr> <td>防食仕様</td> <td>1層：ダイメットコート9</td> <td>75 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2層：アマコート 383HS(ミストコート)</td> <td>25 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3層：アマコート 450GL</td> <td>50 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4層：アマコート 450GL</td> <td>50 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計</td> <td>325 μ</td> </tr> </table>	防食仕様	1層：ダイメットコート9	75 μ		2層：アマコート 383HS(ミストコート)	25 μ		3層：アマコート 450GL	50 μ		4層：アマコート 450GL	50 μ		合計	325 μ	<p>2004年の外観写真(陸側上部)</p> <p>(写真-D.62 参照)</p>
防食仕様	1層：ダイメットコート9	75 μ																
	2層：アマコート 383HS(ミストコート)	25 μ																
	3層：アマコート 450GL	50 μ																
	4層：アマコート 450GL	50 μ																
	合計	325 μ																

表-C.68 鋼管杭 No. K6 タールエポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録																
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工															
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	特に異常は見られない															
施工範囲	+2.52~+6.12	1987年7月	特に異常は見られない															
素地調整	SIS—Sa2.5	1990年8月	飛来物の衝突による傷が見られた															
工法の特徴		1991年8月	前年同様異常は認められない															
		1997年6月	特に異常は認められない															
		2000年7月	特に異常は認められない															
		2002年7月	特に異常は認められない															
施工フロー		被覆材の構成図	断面形状図															
		<table border="1"> <tr> <td>防食仕様</td> <td>1層：SD ジンクプライマーZE100</td> <td>20 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2層：エポシール 600W</td> <td>150 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3層：同上</td> <td>150 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4層：同上</td> <td>150 μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計</td> <td>470 μ</td> </tr> </table>	防食仕様	1層：SD ジンクプライマーZE100	20 μ		2層：エポシール 600W	150 μ		3層：同上	150 μ		4層：同上	150 μ		合計	470 μ	<p>2004年の外観写真(海側上部)</p> <p>(写真-D.63 参照)</p>
防食仕様	1層：SD ジンクプライマーZE100	20 μ																
	2層：エポシール 600W	150 μ																
	3層：同上	150 μ																
	4層：同上	150 μ																
	合計	470 μ																

表-C.69 鋼管杭 No. K7 タールエポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	特に異状は見られない
施工範囲	+2.52~+6.12	1987年7月	特に異状は見られない
素地調整	SIS—Sa2.5	1990年8月	特に異状は見られない
工法の特徴		1992年8月	陸側全域にプリスターが見られた
		1997年6月	昨年同様の状態であった
		2000年7月	昨年同様特に異状は認められない
		2003年7月	上部工接合部からの錆汁が目立つ
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[SDジंकプライマーZE100 20μ] B --> C[エポシール600W 150μ] C --> D[エポシール600W 150μ] D --> E[エポシール600W 150μ] </pre> </div> <div style="width: 30%;"> <p>被覆材の構成図</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>断面形状図</p> </div> </div>			
		2004年の外観写真(海側上部)	<p>(写真-D.64 参照)</p>

表-C.70 鋼管杭 No. K8 ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工
施工面積	7.91 m ²	1986年6月	全体的に良好. 溶接痕に僅かな錆確認
施工範囲	+2.52~+6.12	1987年7月	前年と同様に良好であった
素地調整	SIS—Sa2.5	1989年6月	前年と同様に良好であった
工法の特徴		1992年8月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認. 上部工接合部からも錆汁を確認した
		1993年7月	前年と同様で, 他は良好
		1996年7月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認
		1998年7月	接合端部と溶接痕から錆汁を確認. 上部工接合部からも錆汁を確認した
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>施工フロー</p> <pre> graph TD A[素地調整] --> B[ニッペジンキー8000 15μ] B --> C[インターガード (ガラスフレーク) 300μ] C --> D[インターガード (ガラスフレーク) 300μ] D --> E[インターガード (ガラスフレーク) 300μ] </pre> </div> <div style="width: 30%;"> <p>被覆材の構成図</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>断面形状図</p> </div> </div>			
		2004年の外観写真(海側上部)	<p>(写真-D.65 参照)</p>

表-C.71 鋼管杭 No. K9 水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録															
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工														
施工面積	8.24 m ²	1986年6月	特に異状は認められなかった														
施工範囲	+2.37~+6.12	1987年6月	上部コンクリートの接合部から錆汁														
素地調整	SIS—Sa2.5																
工法の特徴		1988年7月	溶接痕に沿って剥離箇所確認														
		1989年8月	昨年の剥離箇所の発錆はなかった														
		1990年8月	剥離箇所に点錆の増加確認														
		1992年8月	剥離箇所の点錆の発生が拡大していた														
		1995年8月	点錆は増加傾向にあり、海側が顕著														
		1996年8月	点錆の面積が拡大. インピーダンス測定														
		1998年7月	点錆の発生は陸側より海側に多く確認. 溶接痕の塗膜も同様に塗膜劣化が増進														
		2000年3月	終了														
施工フロー		被覆材の構成図	断面形状図														
<table border="1"> <tr> <td>防食仕様</td> <td>1層：水系厚膜型防食塗料</td> <td>250μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2層：同上</td> <td>250μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3層：フッ素樹脂塗料</td> <td>20μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4層：同上</td> <td>20μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計</td> <td>540μ</td> </tr> </table>		防食仕様	1層：水系厚膜型防食塗料	250μ		2層：同上	250μ		3層：フッ素樹脂塗料	20μ		4層：同上	20μ		合計	540μ	
防食仕様	1層：水系厚膜型防食塗料	250μ															
	2層：同上	250μ															
	3層：フッ素樹脂塗料	20μ															
	4層：同上	20μ															
	合計	540μ															
<p>2004年の外観写真(海側上部)</p> <p>(写真-D.66 参照)</p>																	

表-C.72 鋼管杭 No. K10 ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録																		
杭 径	φ 700mm	1985年11月	施 工																	
施工面積	8.24 m ²	1986年6月	特に異状は認められなかった																	
施工範囲	+2.37~+6.12	1987年6月	上部コンクリートの接合部から錆汁																	
素地調整	SIS—Sa2.5																			
工法の特徴		1988年7月	接合部の錆汁以外は良好であった																	
		1989年8月	接合部の錆汁以外は良好であった																	
		1990年8月	付着力テストとインピーダンス測定実施																	
		1993年8月	付着力テストとインピーダンス測定実施																	
		1994年7月	付着力テストとインピーダンス測定実施																	
		1996年8月	インピーダンス測定を実施した																	
		1998年7月	インピーダンス測定を実施. 塗膜性能面では異状は無かった																	
		2000年3月	終了																	
施工フロー		被覆材の構成図	断面形状図																	
<table border="1"> <tr> <td>防食仕様</td> <td>1層：厚膜型エポキシ樹脂ジンキリッチペイント</td> <td>75μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2層：ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料</td> <td>350μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3層：同上</td> <td>350μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4層：フッ素系樹脂塗料</td> <td>20μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5層：同上</td> <td>20μ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>合計</td> <td>815μ</td> </tr> </table>		防食仕様	1層：厚膜型エポキシ樹脂ジンキリッチペイント	75μ		2層：ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料	350μ		3層：同上	350μ		4層：フッ素系樹脂塗料	20μ		5層：同上	20μ		合計	815μ	
防食仕様	1層：厚膜型エポキシ樹脂ジンキリッチペイント	75μ																		
	2層：ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料	350μ																		
	3層：同上	350μ																		
	4層：フッ素系樹脂塗料	20μ																		
	5層：同上	20μ																		
	合計	815μ																		
<p>2004年の外観写真(海側上部)</p> <p>(写真-D.67 参照)</p>																				

表-C.73 鋼管杭 No. K11 湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年12月	施 工
施工面積	8.24 m ²	1986年6月	異状は無いが、塗面の光沢が減少
施工範囲	+2.37~+6.12	1987年6月	光沢減少とチョーキングを確認。上部コンクリート接合部から錆汁確認
素地調整	SIS—Sa2.5		
工法の特徴		1989年8月	同様。塗膜剥離し素地調査は良好
		1991年8月	同様な傾向が認められた
		1993年7月	同様。塗膜剥離し素地調査は良好
		1994年7月	全体的に良好な状態を確認した
		1995年8月	海側 3mに微細なクラック発見した
		1997年8月	クラックの一部で点錆が確認された。特に海側面で錆が拡大している
		2000年3月	終了
施工フロー		被覆材の構成図	断面形状図
			2004年の外観写真(海側上部) (写真-D.68 参照)
防食仕様 1層：ネオゴーサー #6000 300μ 2層：同上 300μ 3層：同上 300μ 合計 900μ			

表-C.74 鋼管杭 No. K12 ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法の概要と調査記録

防食分類	塗 装	主な調査記録	
杭 径	φ 700mm	1985年12月	施 工
施工面積	8.24 m ²	1986年6月	異状は認められない
施工範囲	+2.37~+6.12	1987年7月	異状は無い。チョーキングを確認。上部コンクリート接合部から錆汁確認
素地調整	SIS—Sa2.5		
工法の特徴		1989年8月	接合部の塗膜の1箇所膨れ確認
		1990年9月	海側下部で30×30cm大のクラックと点錆の発生を確認した
		1994年7月	全体的に良好。クラック箇所の錆は拡大
		1995年8月	クラックの面積と錆は拡大していた
		1998年7月	昨年とあまり変化は見られないが、若干錆が拡大している様に見える
		2000年3月	終了
		施工フロー	
			2004年の外観写真(海側上部) (写真-D.69 参照)
防食仕様 1層：ネオゴーサー #20000 500μ 2層：同上 500μ 合計 1000μ			

表-C.75 棧 100 金属溶射防食工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
形状	試験片 150×50 21 枚	2000 年 8 月	工場内施工後、現地に設置
設置位置	銚子側沖へ 100m	2001 年 8 月	膜厚測定の実施。特に異状は無かった
設置レベル	+7.00m 付近 (フェンスに固定)	2002 年 8 月	膜厚測定の実施。特に異状は無かった
素地調整	SIS—Sa2.5	2003 年 8 月	膜厚測定の実施。一部膨れ現象が起きていた。メッキは白錆が多量に発生し、膜厚が大きく増加していた
工法と試験内容	試験片は鋼板 (SS400) の表面を素地調整後、各種金属を溶射した後に封孔処理を施し中央部にクロスカットを入れた。施工工法はフレーム溶射法、アーク溶射法で実施した。別に MS 工法と溶融亜鉛メッキの試験片も設置して試験を実施した。	2004 年 8 月	現地調査後、試験を終了した
2004 年の外観写真 (陸側上部)		設置位置図および被覆構成図	
 (写真-D.70 参照)		 封孔処理 160 g/m ² (1回塗り) 封孔処理 320 g/m ² (2回塗り) 溶射皮膜 鋼板 (SS400) 3.2mm t 100 μm	
防食仕様			
素地調整 : プラスト処理 (SIS—Sa2.5)			
防食溶射材料 : ①アルミニウム ②アルミマグネシウム合金 ③亜鉛アルミ合金 ④アルミニウム擬合金 ※施工後、封孔処理 (有色剤 7 色)			
施工法 : フレーム溶射 (酸素・プロパンガス燃焼), アーク溶射 (2 本の線材でアーク発生) MS 工法と溶融亜鉛メッキ			
施工フロー			
<pre> graph TD subgraph 工場施工 A[資材の準備] --> B[素地調整] B --> C[溶射] C --> D[膜厚検査] D --> E[封孔処理 1回塗り] E --> F[封孔処理 2回塗り] F --> G[型枠への取付] end subgraph 現場施工 H[輸送] --> I[棧橋フェンス外面へ設置] end C --> J[フレーム溶射] C --> K[アーク溶射] G --> L[MS 工法試験片] G --> M[溶融亜鉛メッキ試験片] J --- N[アルミニウム] J --- O[アルミニウム・マグネシウム合金] J --- P[亜鉛・アルミニウム合金] K --- Q[アルミニウム] K --- R[アルミニウム・マグネシウム合金] K --- S[亜鉛・アルミニウム擬合金] </pre>			

表-C.76 棧 300 金属溶射防食工法の概要と調査記録

防食分類	無機ライニング	主な調査記録	
形状	試験片 150×50 21 枚	2000 年 8 月	工場内施工後，現地に設置
設置位置	銚子側沖へ 100m	2001 年 8 月	膜厚測定の実施．特に異状は無かった
設置レベル	+7.00m 付近（フェンスに固定）	2002 年 8 月	膜厚測定の実施．特に異状は無かった
素地調整	SIS—Sa2.5	2003 年 8 月	膜厚測定の実施．特に異状は無かった
工法と試験内容	試験片は鋼板（SS400）の表面を素地調整後，各種金属を溶射した後に封孔処理を施し中央部にクロスカットを入れた．施工工法はフレーム溶射法，アーク溶射法で実施した．別に MS 工法と溶融亜鉛メッキの試験片も設置して試験を実施した．	2004 年 8 月	現地調査後，試験を終了した
2004 年の外観写真（陸側上部）		設置位置図および被覆構成図	
防食仕様			
素地調整：プラスト処理（SIS—Sa2.5）			
防食溶射材料：①アルミニウム ②アルミマグネシウム合金 ③亜鉛アルミ合金 ④アルミニウム擬合金 ※施工後，封孔処理（有色剤 7 色）			
施工工法：フレーム溶射（酸素・プロパンガス燃焼），アーク溶射（2本の線材でアーク発生） MS 工法と溶融亜鉛メッキ			
施工フロー			

付録D 各種防食工法の外観写真

付録D 掲載写真一覧(1)

付録C 写真No.	写真名	付録C 表No.	付録C 掲載頁	付録D 掲載頁
写真-D.1	防食シート接着ライニング工法	表-C.1	89	130
写真-D.2	防食シート接着ライニング工法	表-C.2	89	130
写真-D.3	ダクタリカバーモルタルライニング工法	表-C.3	90	130
写真-D.4	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE工法]	表-C.4	90	130
写真-D.5	セメントモルタル/FRPカバー工法	表-C.5	91	130
写真-D.6	水中硬化型ライニング工法	表-C.6	91	130
写真-D.7	ペトロラタムライニング+耐海水性ステンレス鋼カバー工法	表-C.7	92	131
写真-D.8	水中硬化型ライニング工法	表-C.8	92	131
写真-D.9	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [一体成型防食工法(B法)]	表-C.9	93	131
写真-D.10	水中硬化型ライニング工法(ペイントタイプ)	表-C.10	93	131
写真-D.11	水中硬化型ライニング工法(ペイント+パテタイプ)	表-C.11	94	131
写真-D.12	セメントモルタル/FRPカバー工法	表-C.12	94	131
写真-D.13	水中硬化型ライニング工法 [A法]	表-C.13	95	132
写真-D.14	水中硬化型ライニング工法 [A法]	表-C.14	95	132
写真-D.15	電着工法	表-C.15	96	132
写真-D.16	水中硬化型ライニング工法 [B法]	表-C.16	96	132
写真-D.17	水中硬化型ライニング工法 [B法]	表-C.17	97	132
写真-D.18	電着工法	表-C.18	97	132
写真-D.19	水中硬化型ライニング工法 [C法]	表-C.19	98	133
写真-D.20	電着工法	表-C.20	98	133
写真-D.21	ペトロラタムライニング+FRPPカバー工法 [PTC-N工法]	表-C.21	99	133
写真-D.22	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE工法]	表-C.22	99	133
写真-D.23	ペトロラタムライニング+FRVカバー工法 [FRV工法]	表-C.23	100	133
写真-D.24	ペトロラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE工法]	表-C.24	100	133
写真-D.25	ペトロラタムライニング+FRVカバー工法 [FRV工法]	表-C.25	101	134
写真-D.26	水中硬化型ライニング工法	表-C.26	101	134
写真-D.27	ペトロラタムライニング+アクリル変成塩化ビニールカバー工法 [APC工法]	表-C.27	102	134
写真-D.28	チタンカバーモルタルライニング工法	表-C.28	102	134
写真-D.29	GRC補強カバー工法	表-C.29	103	134
写真-D.30	水中硬化型ライニング工法	表-C.30	103	134
写真-D.31	ペトロラタムライニング+FRPPカバー工法 [PTC-N工法]	表-C.31	104	135
写真-D.32	ペトロラタムライニング+FRP樹脂カバー工法 [PTC-AX工法]	表-C.32	104	135
写真-D.33	セメントモルタル/FRPカバー工法	表-C.33	105	135
写真-D.34	ペトロラタムライニング+耐食アルミカバー工法	表-C.34	105	135
写真-D.35	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	表-C.35	106	135
写真-D.36	防食テープ/FRPカバー工法	表-C.36	106	135

付録D 掲載写真一覧 (2)

付録D 写真 No.	写真名	付録C 表 No.	付録C 掲載頁	付録D 掲載頁
写真-D.37	特殊ウレタン樹脂新被覆工法	表-C.37	107	136
写真-D.38	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-A 工法]	表-C.38	107	136
写真-D.39	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [PTC-FL 工法]	表-C.39	108	136
写真-D.40	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A 法)]	表-C.43	110	136
写真-D.41	ペトロラタムライニング+FRP 樹脂カバー工法 [一体成型防食工法(A 法)]	表-C.44	110	136
写真-D.42	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP-W 工法]	表-C.45	111	136
写真-D.43	極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)	表-C.47	112	137
写真-D.44	極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)	表-C.48	112	137
写真-D.45	CRUS 工法(補強と防食を併せ持つ工法)	表-C.49	113	137
写真-D.46	ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP 工法]	表-C.50	113	137
写真-D.47	ポリエチレンライニング工法	表-C.52	114	137
写真-D.48	ポリエチレンライニング工法	表-C.53	115	137
写真-D.49	ポリエチレンライニング工法	表-C.54	115	138
写真-D.50	ポリエチレンライニング工法	表-C.55	116	138
写真-D.51	ポリエチレンライニング工法	表-C.56	116	138
写真-D.52	K シート+CB テープ巻き+FRP カバー補修法	表-C.57	117	138
写真-D.53	K シート+CB テープ巻き+FRP カバー補修法	表-C.58	117	138
写真-D.54	K シート融着+FRP カバー補修法	表-C.59	118	138
写真-D.55	ペトロラタムライニング工法(FRP カバー法)	表-C.60	118	139
写真-D.56	K シート融着+FRP カバー補修法	表-C.61	119	139
写真-D.57	K シート融着+FRP カバー補修法	表-C.62	119	139
写真-D.58	ガラスフレークポリエステル樹脂塗装工法	表-C.63	120	139
写真-D.59	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	表-C.64	120	139
写真-D.60	超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法	表-C.65	121	139
写真-D.61	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.66	121	140
写真-D.62	厚膜型無機ジンク/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗装工法	表-C.67	122	140
写真-D.63	タールエポキシ樹脂塗装工法	表-C.68	122	140
写真-D.64	タールエポキシ樹脂塗装工法	表-C.69	123	140
写真-D.65	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.70	123	140
写真-D.66	水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗装工法	表-C.71	124	140
写真-D.67	ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗装工法	表-C.72	124	141
写真-D.68	湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法	表-C.73	125	141
写真-D.69	ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法	表-C.74	125	141
写真-D.70	金属溶射防食工法	表-C.75	126	141
写真-D.71	金属溶射防食工法	表-C.76	127	141



写真-D.1 鋼管杭 No.1 防食シート接着ライニング工法 (表-C.1 参照)



写真-D.2 鋼管杭 No.2 防食シート接着ライニング工法 (表-C.2 参照)



写真-D.3 鋼管杭No.2 ダクトカバーモルタルライニング工法(表-C.3 参照)



写真-D.4 鋼管杭 No.3 ペトラタムライニング+ポリエチレン樹脂カバー工法 [PE 工法] (表-C.4 参照)



写真-D.5 鋼管杭 No.4 セメントモルタル/FRP カバー工法(表-C.5 参照)



写真-D.6 鋼管杭 No.5 水中硬化型ライニング工法(表-C.6 参照)



写真-D.7 鋼管杭No.5 ペトロラタムライニング+耐海水性ステンレス鋼カバー工法(表-C.7 参照)



写真-D.8 鋼管杭 No.6 水中硬化型ライニング工法(表-C.8 参照)



写真-D.9 鋼管杭No.6 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [一体成型防食工法(B 法)] (表-C.9 参照)



写真-D.10 鋼管杭 No.7 水中硬化型ライニング工法(ペイントタイプ)(表-C.10 参照)



写真-D.11 鋼管杭 No.7 水中硬化型ライニング工法(ペイント+パテタイプ)(表-C.11 参照)



写真-D.12 鋼管杭No.8 セメントモルタル/FRP カバー工法(表-C.12 参照)



写真-D.13 鋼管杭 No. 9 水中硬化型ライニング工法 [A 法]
(表-C.13 参照)



写真-D.14 鋼管杭 No. 9 水中硬化型ライニング工法 [A 法]
(表-C.14 参照)



写真-D.15 鋼管杭 No. 9 電着工法 (表-C.15 参照)



写真-D.16 鋼管杭 No. 10 水中硬化型ライニング工法 [B 法]
(表-C.16 参照)

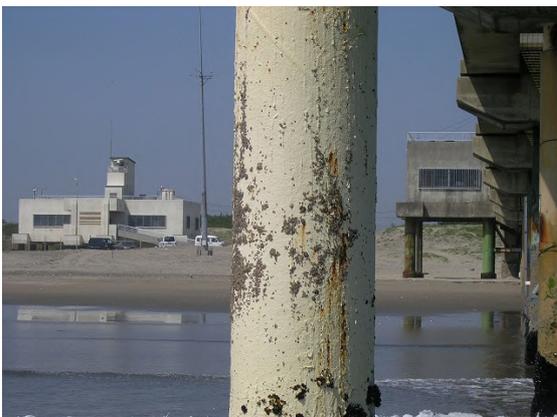


写真-D.17 鋼管杭 No. 10 水中硬化型ライニング工法 [B 法]
(表-C.17 参照)



写真-D.18 鋼管杭 No. 10 電着工法 (表-C.18 参照)



写真-D.19 鋼管杭 No. 11 水中硬化型ライニング工法 [C
法] (表-C.19 参照)



写真-D.20 鋼管杭 No. 11 電着工法(表-C.20 参照)



写真-D.21 鋼管杭 No. 12 ペトロラタムライニング+FRPP
カバー工法 [PTC-N 工法] (表-C.21 参照)



写真-D.22 鋼管杭 No. 13 ペトロラタムライニング+ポリ
エチレン樹脂カバー工法 [PE 工法] (表-C.22
参照)



写真-D.23 鋼管杭 No. 13 ペトロラタムライニング+FRV
カバー工法 [FRV 工法] (表-C.23 参照)



写真-D.24 鋼管杭 No. 14 ペトロラタムライニング+ポリ
エチレン樹脂カバー工法 [PE 工法] (表-C.24
参照)



写真-D.25 鋼管杭 No. 14 ペトロラタムライニング+FRV
カバー工法 [FRV 工法] (表-C.25 参照)



写真-D.26 鋼管杭 No. 15 水中硬化型ライニング工法(表
-C.26 参照)



写真-D.27 鋼管杭 No. 16 ペトロラタムライニング+アクリル
変成塩化ビニールカバー工法 [APC 工法]
(表-C.27 参照)



写真-D.28 鋼管杭 No. 16 チタンカバーモルタルライニング
工法(表-C.28 参照)



写真-D.29 鋼管杭 No. 17 GRC 補強カバー工法(表-C.29 参
照)

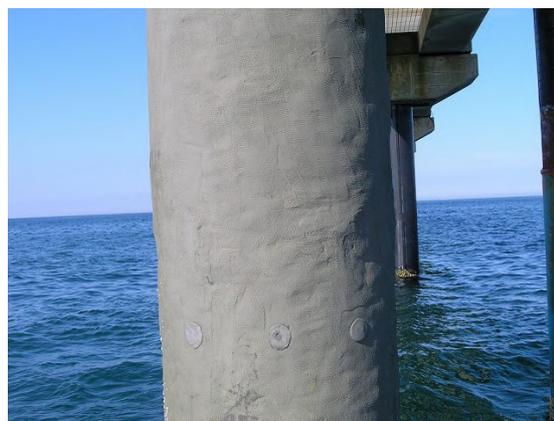


写真-D.30 鋼管杭 No. 18 水中硬化型ライニング工法(表
-C.30 参照)



写真-D.31 鋼管杭 No. 19 ペトロラタムライニング+FRPP
カバー工法 [PTC-N 工法] (表-C.31 参照)

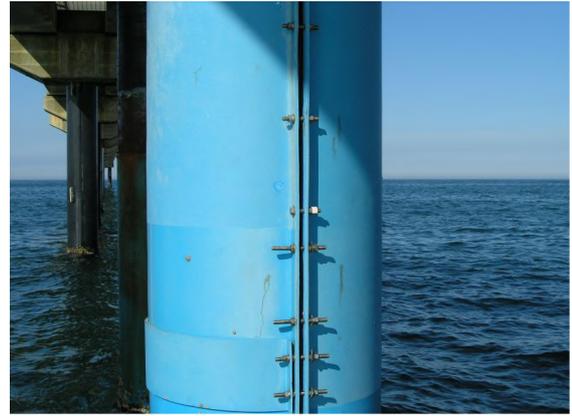


写真-D.32 鋼管杭 No. 19 ペトロラタムライニング+FRP
樹脂カバー工法 [PTC-AX 工法] (表-C.32 参
照)



写真-D.33 鋼管杭 No. 20 セメントモルタル/FRP カバー
工法(表-C.33 参照)



写真-D.34 鋼管杭 No. 20 ペトロラタムライニング+耐食
アルミカバー工法(表-C.34 参照)



写真-D.35 鋼管杭No. 21 特殊ウレタン樹脂新被覆工法(表
-C.35 参照)



写真-D.36 鋼管杭No. 21 防食テープ/FRP カバー工法(表
-C.36 参照)



写真-D.37 鋼管杭 No. 21 特殊ウレタン樹脂新被覆工法(表-C.37 参照)

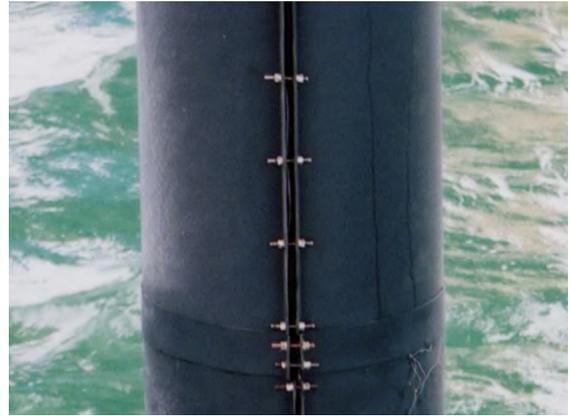


写真-D.38 鋼管杭 No. 22 ペトロラタムライニング+FRP樹脂カバー工法[PTC-A 工法] (表-C.38 参照)



写真-D.39 鋼管杭 No. 22 ペトロラタムライニング+FRP樹脂カバー工法 [PTC-FL 工法] (表-C.39 参照)



写真-D.40 鋼管杭 No. 24 ペトロラタムライニング+FRP樹脂カバー工法[一体成型防食工法(A 法)] (表-C.43 参照)



写真-D.41 鋼管杭 No. 25 ペトロラタムライニング+FRP樹脂カバー工法[一体成型防食工法(A 法)] (表-C.44 参照)



写真-D.42 鋼管杭 No. 25 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP-W 工法] (表-C.45 参照)



写真-D.43 鋼管杭No.27 極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)(表-C.47 参照)



写真-D.44 鋼管杭 No.28 極厚マスチック防食工法(型枠注型工法)(表-C.48 参照)



写真-D.45 鋼管杭No.29 CRUS 工法(補強と防食を併せ持つ工法)(表-C.49 参照)



写真-D.46 鋼管杭 No.29 ペトロラタムライニング+チタンカバー工法 [TP 工法] (表-C.50 参照)



写真-D.47 鋼管杭No.31 ポリエチレンライニング工法(表-C.52 参照)



写真-D.48 鋼管杭 No.32 ポリエチレンライニング工法(表-C.53 参照)



写真-D.49 鋼管杭No.33 ポリエチレンライニング工法(表-C.54 参照)



写真-D.50 鋼管杭 No.34 ポリエチレンライニング工法(表-C.55 参照)



写真-D.51 鋼管杭No.35 ポリエチレンライニング工法(表-C.56 参照)



写真-D.52 鋼管杭 No.31' Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法(表-C.57 参照)



写真-D.53 鋼管杭 No.32' Kシート+CBテープ巻き+FRPカバー補修法(表-C.58 参照)



写真-D.54 鋼管杭 No.33' Kシート融着+FRPカバー補修法(表-C.59 参照)



写真-D.55 鋼管杭 No. 33” ペトラタムライニング工法 (FRP カバー法) (表-C.60 参照)



写真-D.56 鋼管杭 No. 34’ K シート融着+FRP カバー補修法 (表-C.61 参照)



写真-D.57 鋼管杭 No. 35’ K シート融着+FRP カバー補修法 (表-C.62 参照)



写真-D.58 鋼管杭 No. K1 ガラスフレイクポリエステル樹脂塗装工法 (表-C.63 参照)



写真-D.59 鋼管杭 No. K2 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法 (表-C.64 参照)



写真-D.60 鋼管杭 No. K3 超厚膜型エポキシ樹脂塗装工法 (表-C.65 参照)



写真-D.61 鋼管杭 No. K4 ガラスフレークエポキシ樹脂塗
装工法(表-C.66 参照)



写真-D.62 鋼管杭 No. K5 厚膜型無機ジンク/エポキシ/
ポリウレタン樹脂塗装工法(表-C.67 参照)



写真-D.63 鋼管杭 No. K6 タールエポキシ樹脂塗装工法(表
-C.68 参照)



写真-D.64 鋼管杭 No. K7 タールエポキシ樹脂塗装工法
(表-C.69 参照)



写真-D.65 鋼管杭 No. K8 ガラスフレークエポキシ樹脂塗
装工法(表-C.70 参照)



写真-D.66 鋼管杭 No. K9 水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂
塗装工法(表-C.71 参照)



写真-D.67 鋼管杭No.K10 ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗装工法(表-C.72 参照)



写真-D.68 鋼管杭 No.K11 湿潤面用エポキシ樹脂塗装工法(表-C.73 参照)



写真-D.69 鋼管杭No.K12 ガラスフレークエポキシ樹脂塗装工法(表-C.74 参照)



写真-D.70 栈 100 金属溶射防食工法(表-C.75 参照)



写真-D.71 栈 300 金属溶射防食工法(表-C.76 参照)

港湾空港技術研究所資料 No.1123

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人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 ニッセイエプロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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。