

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3687号

## 土木研究所資料

### 外洋に20年間曝露した防食鋼管杭の 耐食性試験報告書

—阿字ヶ浦海岸における鋼管杭の曝露試験—

平成12年1月

建設省土木研究所  
材料施工部化学研究室  
河川部海岸研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所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。

# 外洋に20年間曝露した防食鋼管杭の 耐食性試験報告書

—阿字ヶ浦海岸における鋼管杭の曝露試験—

材料施工部化学研究室 室 長 明嵐 政司  
主任研究員 守屋 進  
河川部海岸研究室 室 長 鳥居 謙一  
研 究 員 山本 幸次

## 要 旨

昭和48年（1973年）から、建設省総合技術開発プロジェクト「海洋構造物の耐久性向上技術の開発」の一環として、化学研究室では構造材料の防食技術の開発研究を開始した。この研究において、鋼管杭協会および（財）国土開発技術研究センターと共同研究で鋼管杭を使用した海洋での長期間の防食曝露試験を開始した。曝露試験は、昭和50年（1975年）に外洋環境の阿字ヶ浦で開始され、曝露期間22年の平成9年（1997年）に終了した。

本報告書は、22年間曝露された防食鋼管杭の耐食性調査を行った結果をとりまとめたものである。

キーワード：外洋環境，長期曝露試験，鋼管杭，耐食性調査

## はじめに

昭和39年（1964）に開催された東京オリンピック以降、建設省では、全国的な高速道路網の整備計画のほか、巨大プロジェクトとして海上や海浜地域に東京湾岸道路や本州四国連絡橋、東京湾横断道路などの建設を予定しており、海域の厳しい腐食環境における鋼材の防食技術の確立が求められていた。

化学研究室では、長大橋梁の塗装技術の向上を目指して、若戸大橋用の塗料の調査研究をはじめ本州四国連絡橋用塗装材料開発のための大気曝露試験を行っていた。また、大気部のみならず、飛沫干満部、海中部、海底土中部における鋼構造物の腐食性状の把握と防食方法の調査研究を進めることとし、東京湾内で曝露試験を実施していた。そしてこれらの調査結果は、それぞれ昭和42年度（1967）と昭和47年度（1972）に土木研究所資料にとりまとめた。

これらの知見から、海域環境で最も腐食環境が厳しく防食方法の開発が必要な部位は、飛沫部・干満部であるとの結論が得られた。

建設省総合技術開発プロジェクト「海洋構造物の耐久性向上技術の開発」が昭和48年（1973）から始まり、その中で化学研究室は「構造材料の防食技術の開発研究」を開始した。この研究は、実海域で実大鋼構造物を用いて、飛沫干満部を対象として民間で開発された防食技術を活用した長期間の曝露試験を行い、その防食性能を評価するものであった。

土木研究所は、鋼管杭協会および（財）国土開発技術研究センターと共同研究を行い、防食ぐい開発委員会を設置して、鋼管杭を使用した海洋での長期間の防食曝露試験を実施することとなった。

鋼管杭の曝露試験は、昭和49年（1974）に内湾環境の千葉沖で、昭和50年（1975）に外洋環境の阿字ヶ浦で開始された。

千葉沖の試験は、曝露期間11.5年の昭和61年（1986）に終了したが、阿字ヶ浦の試験は曝露期間22年の平成9年（1997）に終了した。この間、共同研究は昭和51年（1976）に終了していたが、阿字ヶ浦曝露試験は、海浜調査としての漂砂観測用栈橋を防食調査用として共同使用していた関係上、曝露試験は栈橋撤去まで継続され、結果的に22年間にわたる長期間の曝露試験となった。しかしながら、大変貴重な長期間にわたる各種防食材料の曝露試験結果が得られることが期待された。

そこで、土木研究所では、化学研究室と海岸研究室が協力しこれら曝露試験体を回収して調査することとした。調査は、当初の共同研究相手である鋼管杭協会の協力を受けて実施した。

調査結果のとりまとめと検討にあたっては、20年以上前の当初の研究実施経緯と途中の調査経過などの事実関係を考慮する必要があるため、阿字ヶ浦防食鋼管杭の調査委員会（委員長蒔田 實（財）土木研究センター 参与）を設け、土木研究所および鋼管杭協会の諸先輩のご協力を受けて行った。

今日の技術レベルは、20年前より格段に向上しており当時の防食技術や材料がそのまま現在適用できるとは一概には言えない。とくに高分子材料の進歩は日進月歩であるため、必要に応じて今日の技術を加味して調査結果を見直した。

本調査結果は、実環境での20年という長期間の飛沫部・干満部における各種防食材料の耐久性を評価したものであり、今後の海洋開発に非常に役立つデータが得られた。また、漂砂と鋼管杭腐食との関係をも明らかにすることができた。

本報告書の構成は、以下のように5編で構成した。

- 第1編 防食鋼管杭の曝露試験経過概要
- 第2編 新設防食鋼管杭の曝露試験の調査結果（沖側100m）
- 第3編 既設鋼管杭の防錆防食調査結果（海岸汀線側100m）
- 第4編 漂砂による鋼管杭の磨耗について
- 第5編 鋼管杭の曝露試験結果の総括

## 目 次

はじめに

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第1編 防食鋼管杭の曝露試験の概要                  | 1  |
| 1. 長期曝露試験の開始                       | 1  |
| 1.1 試験開始の背景                        | 1  |
| 1.2 共同研究の開始                        | 1  |
| 1.3 曝露試験計画                         | 2  |
| 1.4 曝露試験の状況                        | 2  |
| 1.5 従来の漂砂観測用栈橋を利用した共同研究以外の曝露試験     | 4  |
| 1.6 栈橋の呼称                          | 4  |
| 1.7 各種試験の概要                        | 4  |
| 2. 曝露試験用の漂砂観測用栈橋の概要                | 6  |
| 2.1 栈橋を利用した各種調査試験                  | 6  |
| 2.2 栈橋の構造等                         | 6  |
| 3. 曝露試験経過                          | 8  |
| 3.1 延長した栈橋の新設防食鋼管杭の曝露試験（沖側100m）    | 8  |
| 3.2 既設栈橋の鋼管杭の補修試験（汀線側100m）         | 11 |
| 3.3 曝露試験期間中の各種調査                   | 14 |
| 3.4 20年経過の施設撤去と鋼管杭の引抜き             | 14 |
| 3.5 引抜き鋼管杭の調査分類                    | 15 |
| 3.6 設置以来の曝露試験の経過表                  | 16 |
| 4. 引抜いた鋼管杭の調査方法                    | 18 |
| 4.1 沖側100m新設の防食鋼管杭の調査（全数調査と選別調査）   | 18 |
| 4.2 汀線側100m補修した既設鋼管杭の調査（全数調査と選別調査） | 18 |
| 第2編 新設防食鋼管杭の曝露試験の調査結果（沖側100m）      | 26 |
| 1. 調査概要                            | 26 |
| 1.1 調査目的と経緯および調査分担                 | 26 |
| 1.2 調査内容                           | 26 |
| 2. 調査方法                            | 31 |
| 2.1 現地調査                           | 31 |
| 2.2 詳細調査                           | 32 |
| 3. 現地調査結果                          | 37 |
| 3.1 生物付着状況の外観目視観察                  | 37 |
| 3.2 付着生物除去後の外観目視観察                 | 56 |
| 3.3 肉厚測定                           | 64 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 3.4 防食被覆厚測定                             | 67  |
| 4. 詳細調査結果                               | 68  |
| 4.1 詳細調査対象杭の外観                          | 68  |
| 4.2 無防食(炭素鋼無処理)鋼管杭の調査                   | 68  |
| 4.3 耐海水鋼(Cr-Al)巻鋼管杭の調査                  | 71  |
| 4.4 塗覆装鋼管杭の調査                           | 77  |
| 4.5 セメントモルタルライニング鋼管杭の調査                 | 87  |
| 4.6 有機ライニング鋼管杭の調査                       | 90  |
| 5. 調査結果の検討                              | 98  |
| 5.1 無防食(炭素鋼無処理)鋼管杭                      | 98  |
| 5.2 耐海水鋼巻き鋼管杭                           | 98  |
| 5.3 無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭         | 98  |
| 5.4 無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭     | 98  |
| 5.5 セメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭       | 98  |
| 5.6 ポリウレタンゴムライニング鋼管杭                    | 102 |
| 5.7 ポリエチレン押し出しライニング(粘着剤仕様)鋼管杭           | 102 |
| 6. まとめ                                  | 104 |
| 6.1 鋼管杭の腐食環境特性                          | 104 |
| 6.2 防食鋼管杭の耐久性                           | 104 |
| <b>第3編 既設鋼管杭における防食被覆の調査</b>             | 110 |
| 1. 調査概要                                 | 110 |
| 1.1 調査目的                                | 110 |
| 1.2 調査内容                                | 110 |
| 2. 調査方法                                 | 114 |
| 2.1 引抜き前の調査                             | 114 |
| 2.2 引抜き後の調査                             | 114 |
| 2.3 切り取り試験体の調査                          | 116 |
| 3. 調査結果および考察                            | 117 |
| 3.1 生物付着状況調査結果                          | 117 |
| 3.2 目視観察結果                              | 117 |
| 3.3 詳細調査結果                              | 127 |
| 3.4 総合評価結果                              | 136 |
| 3.5 ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバーに関する試験結果 | 138 |
| 3.6 鋼管杭の肉厚測定結果                          | 141 |
| 4. 調査結果の検討                              | 143 |
| 4.1 補修効果について                            | 143 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 4.2 施工上の問題点と対策について       | 146        |
| 5. まとめ                   | 147        |
| 5.1 補修の必要性               | 147        |
| 5.2 補修の困難性               | 147        |
| 5.3 防食被覆の工場施工と現地施工の性能比較  | 147        |
| 5.4 鋼管以外の防食対象面への適用       | 148        |
| 5.5 補修用推奨防食仕様            | 148        |
| <b>第4編 漂砂による鋼管杭の摩耗特性</b> | <b>151</b> |
| 1. はじめに                  | 151        |
| 2. 阿字ヶ浦海岸における海浜断面変形と漂砂現象 | 151        |
| 2.1 海浜断面変形               | 151        |
| 2.2 浮遊砂の観測               | 152        |
| 2.3 砂層厚の推定               | 153        |
| 3. 漂砂による鋼管杭の摩耗状況         | 154        |
| 3.1 鋼管杭の摩耗状況             | 154        |
| 3.2 鋼管杭周辺での地盤変動          | 154        |
| 3.3 漂砂による鋼管杭の摩耗に関する考察    | 157        |
| 4. おわりに                  | 158        |
| <b>第5編 鋼管杭の曝露試験結果の総括</b> | <b>161</b> |
| 1. 新設用防食鋼管杭について          | 161        |
| 1.1 阿字ヶ浦での曝露試験結果         | 161        |
| 1.2 新設用防食被覆について          | 162        |
| 1.3 防食被覆                 | 162        |
| 2. 鋼管杭の補修について            | 164        |
| 2.1 阿字ヶ浦での補修試験結果         | 164        |
| 2.2 補修用防食仕様の作成           | 164        |
| 2.3 補修用推奨防食仕様例           | 164        |
| 2.4 補修用推奨防食仕様の適用性        | 168        |
| 3. 漂砂による鋼管杭の摩耗について       | 169        |
| 3.1 海岸工学的解析              | 169        |
| 3.2 漂砂等摩耗対策について          | 169        |
| <b>あとがき</b>              | <b>170</b> |

## 第1編 防食鋼管杭の曝露試験の概要

### 1. 長期曝露試験の開始

#### 1. 1 試験開始の背景

昭和40年代（1970）後半は、昭和39年（1964）に開催された東京オリンピックの基盤整備事業につづく建設省所管の各種巨大プロジェクトの事業計画が、その実現に向かって、各種の技術検討が急がれていた時代であった。

とくに、東京湾横断道路、本州四国連絡橋、関西国際空港等の海域や海浜周辺での建設計画、およびそれらにアクセスする首都高速道路、阪神高速道路等の道路橋に使用される鋼材の腐食防止対策の確立と新しい防食方法を急ぎ策定することが要請されていた。

これに先立ち建設省土木研究所（化学研究室）では、中心に東京湾内、瀬戸内、沖縄地域等で各種防食材料の曝露試験を実施していた。

一方、鉄鋼メーカーでも、世界的な油田開発ブームとそのパイプラインの防錆防食に適用するための各種防食技術の開発を行っており、建設系鋼構造物の防食法については、塗料製造業および電気防食会社各社の協力を得て各種試験を実施し、腐食現象、防食対策、厚膜被覆等の研究開発を行っていた。

学会でも例えば（社）地盤工学会（当時、土質工学会）では、国内10箇所を選び126本の試験杭を土中に打設し、地盤状況別の鋼材の腐食性状を調べるため10年間の長期曝露試験を実施し、委員長大崎順彦東大教授により一部その成果が発表されつつあった。

防錆防食試験は、当時室内での促進試験、屋外での試験片による曝露試験が進められていたが、実大の鋼構造物の腐食性状を知るには、小試験片ではマクロセル腐食現象等の把握が困難なため実構造物の腐食現象を再現した再現性よいデータが得られないことが痛感されていた。

特に、海域での鋼材の腐食性は、他の内陸部や山間部等の腐食環境に比し最も激しいことが知られていた。海域環境にあっても、海水面に対して垂直な方向に区分した部位により腐食性状に大きな差があるので、海域の環境区分を上から下方に向かって海上大気部、飛沫部、干満部、海中部、海底土中部と区分している。このうち、飛沫部が際立って腐食が激しいことがこれまでの試験から知られていた。

すなわち、東京湾横断道路、本州四国連絡橋、関西国際空港等の海域や海浜周辺におけるプロジェクトを推進するためには、最も腐食条件が厳しい海域環境の飛沫部の腐食性状を把握し、海域環境における鋼構造物の防食方法を確立することが求められていた。

#### 1. 2 共同研究の開始

##### （1）共同研究の経緯

このような状況下において建設省土木研究所では、建設省総合技術開発プロジェクト「海洋構造物の耐久性向上技術の開発」を推進することとなり、その一環として化学研究室は、昭和48年度（1973）から「構造材料の防食技術の開発」を実施することとなった。

研究開発の推進は、民間との共同研究ですすめることとなった。かねてより鋼材（鋼管杭）の腐食防食の研究開発を行っていた鋼管杭協会と、プロジェクト推進窓口である財団法人国土開発技術研究センターを加え、建設省土木研究所との3者による共同研究を行うこととなった。

##### （2）共同研究の内容

課 題：構造材料の防食技術の開発

期 間：昭和48年度（1973）～昭和51年度（1976）

当事者：建設省土木研究所

財団法人国土開発技術研究センター

鋼管杭協会

研究内容：鋼管杭を使用した海洋での長期間の防食曝露試験

費用負担：建設省土木研究所、鋼管杭協会

曝露試験期間：共同研究は、昭和51年度（1976）に終了とするが、本研究は長期曝露を予定するので、共同研究終了後も引き続き、土木研究所と鋼管杭協会とで試験を継続することとし、少なくとも10年を超える曝露期間を確保することで合意した。

研究経過：昭和48年度（1973）；文献調査等を行った。

昭和49年度（1974）；内湾環境である東京湾千葉沖で曝露試験着手。

昭和50年度（1975）；外洋環境の茨城県阿字ヶ浦で曝露試験着手。

昭和51年度（1976）；共同研究終了、曝露試験は継続実施。

昭和61年度（1986）；千葉沖曝露試験終了。（11.5年間曝露）

平成9年度（1997）；阿字ヶ浦試験杭引抜き調査。（22年間曝露）

## 1. 3 曝露試験計画

### （1）候補地の選定

曝露試験を10年以上実施するので曝露場所の選定にあたっては、試験適地を選定する必要があった。

場所の選定には、全国2～4箇所を考え、漁業権利の有無、設置工事のし易さ、毎年調査の便利さ、維持管理費の安さ、撤去のし易さ、試験妨害の有無、盗難防止等の要件を細かく検討した。

まず、東京湾横断道路を見込んで、内湾環境の東京湾から1箇所を選ぶこととした。富津先の海苔養殖地域では、漁業組合の内諾を得たが種々検討の結果、既に漁業権が消滅して千葉港区域となっており、鋼管杭協会の会員会社でもある川崎製鉄(株)の千葉工場の沖合が、研究上維持管理上並びに防災上からも好都合であるのでここを曝露試験地とし選定した。

次いで、内湾環境の東京湾に対し、外洋環境から1箇所を選定することとしたが選定は困難を極めた。

たまたま、土木研究所の海岸研究室所管の実験施設が、茨城県阿字ヶ浦にあった。これは、阿字ヶ浦海岸にある漂砂観測用栈橋で、海岸から沖合方向に向かって延長100mの鋼管杭使用の栈橋があったが、それを沖合に向かってさらに100m延長し、合計200mの栈橋にするという計画があった。ここは、夏場は海底砂が海岸周辺に集まり、冬場は海岸近くに集まった海底砂が一举に沖合に移動するという、わが国では名立たる漂砂現象が発生する場所であった。さらには、数波のうち1波は高波が襲うという、外洋性の波浪と高い砕波が発生する海岸であった。（写真1.2-2）

土木研究所（海岸研究室担当者と化学研究室担当者）と鋼管杭協会とで協議した結果、共同研究の負担区分を設定することとし、新設延長する漂砂観測用栈橋100m分の上部工トラス部は海岸研究室が、下部工の鋼管杭とその防食被覆は化学研究室と鋼管杭協会に負担管理するという合意が成立し、ここに腐食環境が厳しき波浪の高い外洋環境の曝露試験地として阿字ヶ浦を選定した。

### （2）曝露試験の目的・方法とその内容

目的：海域の腐食環境の中で最も厳しい飛沫部、干満部について、その防食方法を確立する。

（新設用の防食方法を見込む）

方法：実大実験として、海底に打ち込んだ実用の鋼管杭表面に各種防食被覆を施し、その性状を調査し、長期耐用に適する防食材料を見いだすため概ね10年を目途に長期曝露試験を行う。

場所：内湾環境として、東京湾内千葉沖に新たに曝露施設を設置する。

波浪飛沫を伴う外洋性環境として、茨城県阿字ヶ浦海岸にある建設省土木研究所所有の漂砂観測用栈橋の延長予定部分の橋脚用鋼管杭を利用する。

防食被覆の種類：新規の鋼管杭表面の飛沫部、干満部に塗覆装（重防食塗装、金属被覆、有機被覆、無機被覆）10種類前後を工場施工（一部現地施工あり）したものを使用する。比較材料として、無防食の裸鋼管杭も1本加える。（なお、電気防食法は、常時没水部の部位に適用する防食方法と位置付けしたので、採用していない。）

## 1. 4 曝露試験の状況

### （1）千葉沖曝露試験の状況と留意事項

千葉沖の曝露試験は、昭和50年（1975）2月に防食鋼管杭の打設を終了し引き続き曝露を開始して、当初

からの予定どおり、昭和61年（1986）9月に鋼管杭を引抜き調査を行った。曝露期間は約11.5年間である。

この曝露試験の調査結果は、昭和61年度（1986）と平成元年度（1989）に報告書を作成している。

## （2）阿字ヶ浦曝露試験の特殊状況

阿字ヶ浦の漂砂観測用栈橋橋脚の鋼管杭を利用した曝露試験は、昭和51年（1976）2月に防食鋼管杭の打設を行った。曝露10年を経過した昭和61年度（1986）に一応の試験は終了した。本来ならばこの時点で、防食鋼管杭を引抜いて詳細調査を行う必要があった。しかしながら、阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋に設置した防食鋼管杭は、栈橋の脚柱となっているので、施設の利用という立場から、海岸研究室の漂砂観測が続いている限りは、撤去することができないので10年曝露の期間が経過した後も詳細調査を実施することができず、立ち姿の外観目視観察のみを続けざるを得なかった。

防食鋼管杭設置から20年を経過した頃、茨城県那珂湊港湾整備計画が実行に移され工事が開始されることとなり、これを受けて漂砂観測用栈橋が撤去されることとなった。

海岸研究室では、この施設撤去にあたり防食鋼管杭の引抜きが可能であるかどうか、撤去方法をどうするか等を検討するため、平成8年（1996）栈橋撤去工法検討委員会を設けて審議し、その結果、防食鋼管杭は、海底地盤下2m程度の部位で水中切断して引抜き一部を土中に残置するという結論となった。

海上保安庁との協議も整い平成10年（1998）3月、栈橋は取り壊され防食鋼管杭は、海底面下で水中切断を行い引抜き撤去され防食性能に関する詳細調査が行われた。昭和51年（1976）2月、防食鋼管杭の曝露開始以来、平成10年（1998）3月引抜き完了まで、22年間の長期にわたる曝露試験の貴重な資料を得ることができた。

## （3）阿字ヶ浦曝露試験条件の特殊性

阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋の新設延長部分100mの施設を共同利用する試験であることから、防食鋼管杭の試験条件を決めるにあたって、栈橋固有の設置条件のもとで行わざるを得なかった。

当時の栈橋構造の情報と条件は、次のとおりである。

- ①上部トラスの構造は、既存構造形式と同一形状とし海拔水準は同一とする。（このことから、下部工各部位の高さ水準の制限が生じた。）
- ②橋脚部の鋼管杭配置は、既存構造は矩形断面であるが、杭ごとに受ける波力を均等にするため、菱形断面とする。
- ③海底付近には砂の移動があり、その漂砂現象で夏と冬で海底面の高さが変動する。いわゆるサンドエロージョンが考えられ洗掘もある。
- ④杭の支持層となる海底地盤の状況が不明であった。
- ⑤既存栈橋先端付近の波浪高さは得られていたが、200m先の新設栈橋先端の波浪高さは不明であった。とくに、冬期に多い数波に1波出現するという高波が施設の杭に衝突してどのような砕波となり、どのように飛散するかは不明であった。このことは、飛沫部の上限を特定するとき必要な情報であったが、当時は決めきれなかった。
- ⑥各防食鋼管杭からの腐食電流の相互干渉を防止するため、菱形配列の各杭頭を絶縁処理することとする。その上端上にH型鋼材を枕材として配置しその上に上部工のトラスを乗せた。既設栈橋の杭頭には、そのような絶縁処理はなされていなかった。
- ⑦トラスの高さから算定し、杭上端部の水準をT.P. +4.4mとする。（打撃貫入させる防食鋼管杭の打ち止まり高さとなる。）
- ⑧絶縁用に用いる鞘管の保持用の工作を現地で行うため余裕幅を見込んで、新規防食被覆をする防食上限を杭頭から1m下げたT.P. +3.4mとする。
- ⑨調査した土質柱状図から判断して、海底面下1～2mまでは柔らかい砂質で、その下は硬質粘土（土丹層）となっており、上載荷重が小さいので杭の鉛直支持力は十分得られそうであり、杭の根入れ長さの計算には、波力の横方向支持力を検討した。ディーゼルハンマでの打撃貫入時に杭先端が貫入困難となる恐れがあったので、鋼管杭先端にフリクションカッターを装着した。

⑩漂砂現象が発生するので、洗掘あるいはサンドエロージョン対策として、無防食鋼管杭の外側に鞘管状のガードリングを装着した。

⑪防食鋼管杭の防食範囲は、飛沫部から常時没水部までとするが、上記の防食上限高さ(T.P.+3.4)からT.P.-2.6までの6mの長さとする。

⑫通常の鋼構造物では防食被覆の端部は、入念な腐食遮断処置を施すが、今回の防食試験用の鋼管杭では、あえてそれを行わず端部処理はしない。そのことにより、波の衝撃によるダメージの影響や端部からの塩分の浸入による鋼素地の腐食等、飛沫部環境の曝露試験としての更に苛酷な促進試験の要素を持つこととなった。

⑬鋼管杭打設には工事中の各種損傷がつきものであるが、もし、クレーンのフックの衝撃などで防食被覆に傷を受けたら、通常は即補修であるが、傷部からの腐食性物質の浸入により被覆がどうなるかを見ることとし、あえて補修はせずこのまま曝露することとした。

## 1. 5 従来の漂砂観測用栈橋を利用した共同研究以外の曝露試験

共同研究に使用される漂砂観測用栈橋は、従来の漂砂観測用栈橋を沖合方向にさらに100m延長する予定の栈橋部分の脚柱が対象であった。

既存の栈橋は、昭和47年度(1972)に着工し、昭和48年3月(1973)に完成した延長100mの漂砂観測用栈橋であった。この栈橋の脚柱には、無防食の裸鋼管杭が使用されており設置当初から無防食状態で供用されていた。その後、4年間(昭和48~51年)で平均1mmの肉厚減少が観測されたので補修が実施された。

この補修は、供用中の鋼材の補修防食試験との位置付けで、補修方法を変えつつ昭和51年度(1976)に第1次補修、昭和56年度(1981)に第2次補修が施工された。

本報告書では、第3編にこの補修試験の詳細調査結果を示してある。

## 1. 6 栈橋の呼称

この報告書では、共同研究実施場所となった延長新設した栈橋100mを沖側栈橋と呼称し、補修試験を実施した既存栈橋100mを海岸汀線側栈橋あるいは汀線側栈橋と呼称して区別している。

## 1. 7 各種試験の概要

この報告書は、外洋環境にある阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋を利用して得られた以下の調査結果をとりまとめた。

①防食鋼管杭の長期曝露試験結果(沖側栈橋橋脚鋼管杭を利用した試験)

②鋼管杭の補修試験結果(海岸汀線側栈橋橋脚鋼管杭を利用した試験)

③漂砂現象とサンドエロージョン試験結果

防食試験結果の解析とまとめにあたっては、この試験が20数年前に計画され実施された試験であるので試験開始前後の状況とその後の経過を記述した。

また、今日の技術レベルは、20年前の技術レベルより格段に向上しており、当時の防食技術・防食材料をそのまま今日に通用できない。とくに、高分子材料は、日進月歩の発展をしているので今日の技術水準を踏まえて曝露試験結果を整理した。

したがって、上記の調査結果を以下のように構成して報告書とした。

### 第1編 防食鋼管杭の曝露試験概要

- ・20数年前の状況、試験開始前後の状況等
- ・各種曝露試験を行った阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋の構造、海象等
- ・20年経過した曝露試験の経過と引抜き調査

### 第2編 新設防食鋼管杭の曝露試験の調査結果(沖側100m)

- ・共同研究で実施した曝露試験の詳細調査結果

### 第3編 既設鋼管杭の防錆防食調査結果(海岸汀線側100m)

- ・補修試験をした防食被覆の曝露後の調査結果

### 第4編 漂砂による鋼管杭の摩耗特性

- ・漂砂現象と鋼材表面の摩耗腐食の数値解析

## 第5編 鋼管杭の曝露試験結果の総括

- ・曝露結果の総括と新設用防食法、補修用防食法の提言

## 2. 曝露試験用の漂砂観測用栈橋の概要

### 2. 1 栈橋を利用した各種調査試験

漂砂観測用栈橋を使って、次のような調査試験が行った。

- ①漂砂機構解明のため、海象現象の長期的観測
- ②新規防食曝露試験
- ③防食補修試験
- ④海上大気部の塗装材料開発試験

栈橋は、当初①の漂砂、海浜流、砕波地域の海底変動等の長期観測をするため、栈橋上部工のデッキから計測するために設置されたが、高い波浪や砕波による激しい衝撃を受けるといった厳しい環境にあり、腐食防食の研究には最適の場所であるため、②、③、④と逐次既存栈橋の鋼材部の補修を兼ねた防錆防食の補修試験、あるいは栈橋を延長するのを機に防食鋼管杭の曝露試験を行うなど多目的に利用されてきた。

### 2. 2 栈橋の構造等

#### (1) 栈橋の諸元

栈橋延長：汀線側100m（実長96.9m）      沖側100m（実長98.7m）      総延長200m  
昭和48年(1973)3月完成      昭和(1976)2月完成

上部工：トラス構造、幅1.5m×高さ1.5m

汀線側    スパン15.0m×1    30.0m×2    21.0m×1

沖側    スパン25.5m×1    24.0m×3

下部工：汀線側    裸鋼管杭  $\phi 355.6\text{mm} \times t11.4\text{mm} \times L10\text{m} \times 2$  本    後日防食補修施工

〃     $\phi 406.4\text{mm} \times t12.7\text{mm} \times L14\text{m} \times 4$  本    〃

〃     $\phi 406.4\text{mm} \times t12.7\text{mm} \times L16\text{m} \times 4$  本    〃

〃     $\phi 508\text{mm} \times t12.7\text{mm} \times L18\text{m} \times 4$  本    〃

〃     $\phi 609.6\text{mm} \times t12.7\text{mm} \times L19\text{m} \times 2$  本    〃

橋脚    Ps 0 (杭2本)、Ps 1 (杭4本)、Ps 3 (杭4本)、Ps 4 (杭2本)

沖側    防食鋼管杭  $\phi 609.6\text{mm} \times t14\text{mm} \times L16\text{m} \times 18$  本    材質 S K K 400

ただし、杭番号No. 8 No. 8' の防食鋼管杭は  $\phi 600.0\text{mm}$

橋脚    Ps 5 (杭2本)、Ps 6 ~ Ps 9 (杭各4本)

#### (2) 上部工、下部工の形状・配置寸法等

既設栈橋（汀線側100m）、延長新設した栈橋（沖側100m）の上部工のトラス部と下部工の橋脚部の側面構成、防食被覆鋼管杭の配置状況、鋼管杭の寸法、防食範囲、杭根入端、海底面の高さ土質柱状N値、推定硬質粘土層の高さ（最低地盤高の包絡線）、杭引抜き時の水中切断高さ等をあらわしたものを図1.2-1に示す。

#### (3) 栈橋全景

漂砂観測用栈橋の設置以来20年以上経過した時点での栈橋全体の現況を写真1.2-1に示す。

#### (4) 波浪発生状況

漂砂観測用栈橋付近に発生する典型的な波の状況を、写真1.2-2に示す。

上段の写真は、極めて穏やかな好天時の砕波の状況を示したものである。

中段の写真は、数波の後に1波の高い波が来襲するが、波が盛り上がった砕波直前の状況を示したものである。

下段の写真は、高波が砕波し杭に波力を与えつつ飛沫が飛散して上部工のトラス部まで海水が飛び散っている状況を示したものである。トラス底面の高さは、T.P. +4.55mである。

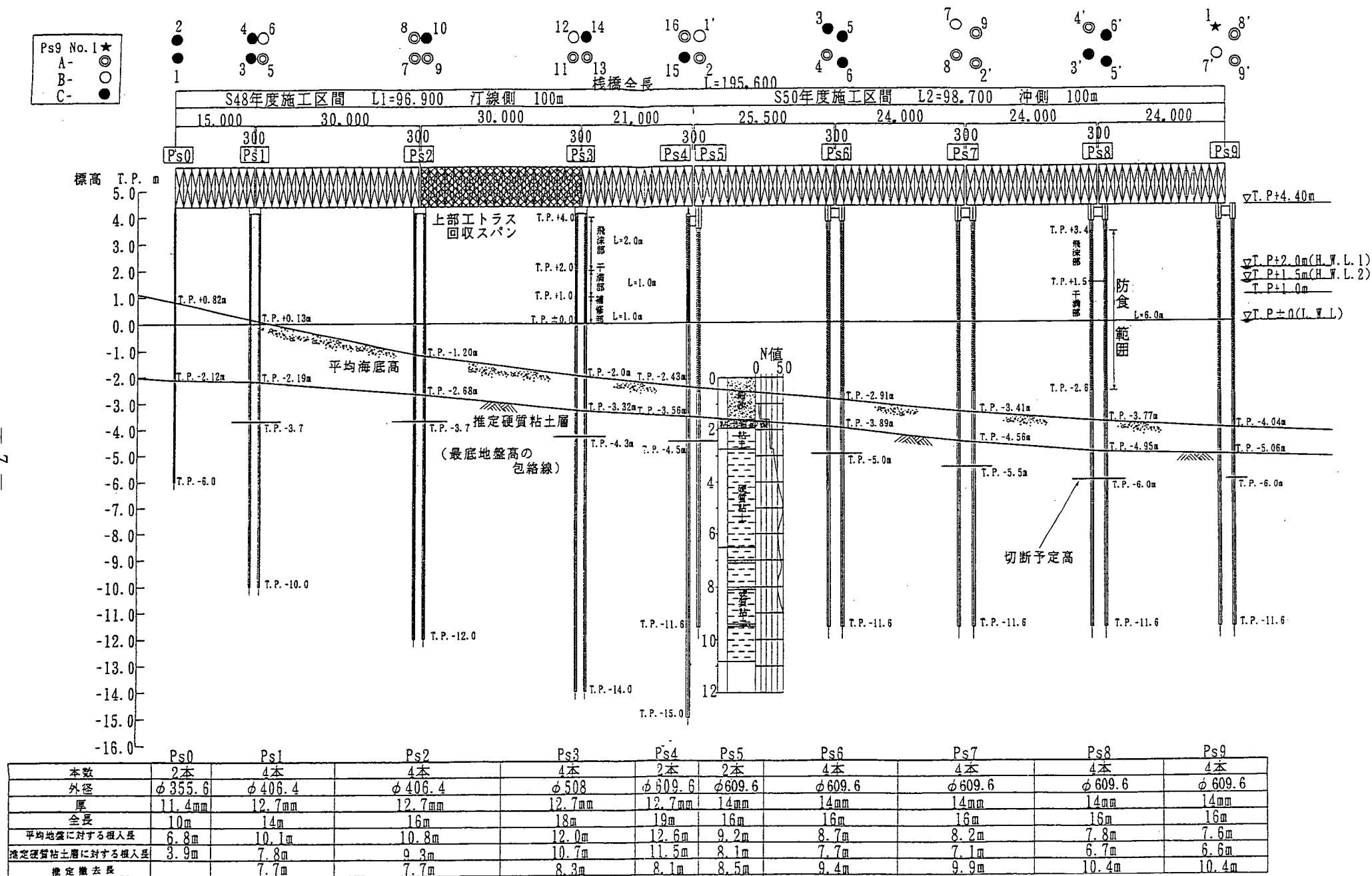


図1. 2-1 阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋側面・防食被覆鋼管杭配置図

### 3. 曝露試験経過

#### 3. 1 延長した栈橋の新設防食鋼管杭の曝露試験（沖側100m）

##### （1）防食被覆の範囲と環境区分

| 環境区分  | 防食範囲 | 水 準         | 備 考           |
|-------|------|-------------|---------------|
| 海上大気部 |      |             |               |
|       |      | T. P. +3.4m | 防食被覆上端        |
| 飛沫部   | 6m   |             |               |
|       |      | T. P. +1.5m | 高水位(HWL)      |
| 干満部   |      | T. P. ± 0 m | 低水位(LWL)      |
|       |      | T. P. -2.6m | 防食被覆下端        |
| 海中部   |      |             | (漂砂現象)<br>海底面 |
| 海底土中部 |      |             |               |

##### （2）防食鋼管杭および防食試験片とその配置

共同研究として進めることとなった沖側100mの新設防食鋼管杭の防食被覆の種類、その配置状況および試験片の種類を以下に示す。（表1.3-1、表1.3-2）

沖側100mには、ピヤ番号Ps 5 から沖側に向かってPs 9 まで5 基の橋脚があり、1 基に4 本の防食鋼管杭（φ609.6×t14×L16000）が配置されている。（ただし、Ps 5 のみは2 本）（写真1.2-1）

防食鋼管杭は、防食仕様1 種類につき2 本を供試した。（ただし、耐海水性鋼材は1 本）

防食試験片（φ100A×t14.5×L2000）は、海岸汀線側のピヤPs 3 に架台を装着して飛沫部環境下で曝露した。

これらの防食鋼管杭および防食試験片の防食被覆の施工は、鋼管杭協会加盟の製鉄メーカーがそれぞれ加工を担当し、工場で被覆加工し防食被覆の加工済みの鋼管杭を現地に運び、現場での杭打を行った。

沖側100m部分の防食鋼管杭の曝露状況を写真1.3-1に示す。ここに示した曝露状況の写真は、設置当初ではなく引抜き撤去直前（22年間曝露）のものである。

表1.3-1 沖側100m部分の防食鋼管杭の種類一覧表

| ピ<br>No. | 鋼管<br>杭<br>No. | 防 食 被 覆 の 種 類                                                      | 備 考                            |
|----------|----------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|          |                | 飛沫部・干満部(6m範囲) (T.P. +3.4m~T.P. 2.6m)                               | 昭和51年2月(1976)から曝露開始 (曝露満22年経過) |
| Ps<br>5  | 1'             | 耐海水鋼(Cr-Al系)巻き(6mm)                                                | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 2              | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)       | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
| Ps<br>6  | 3              | アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス   | 目視観察                           |
|          | 4              | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス   | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 5              | エポキシ系レジンモルタルライニング(4mm)                                             | 目視観察                           |
|          | 6              | ウレタンマスチックライニング(3mm, 骨材入り)                                          | 目視観察                           |
| Ps<br>7  | 2'             | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)       | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 7              | モルタルライニング(47mm)+FRPカバー(3mm)                                        | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 8              | ポリウレタンゴムライニング(7mm)                                                 | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 9              | ポリエチレンライニング(4mm)(粘着材仕様)                                            | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
| Ps<br>8  | 3'             | アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+ガラスフレーク入りタールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) | 目視観察                           |
|          | 4'             | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+ガラスフレーク入りエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 5'             | エポキシ系レジンモルタルライニング(4mm)                                             | 目視観察                           |
|          | 6'             | ウレタンマスチックライニング(3mm, 骨材入り)                                          | 目視観察                           |
| Ps<br>9  | 1              | 無防食                                                                | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 7'             | モルタルライニング(47mm)+FRPカバー(3mm)                                        | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 8'             | ポリウレタンゴムライニング(7mm)                                                 | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |
|          | 9'             | ポリエチレンライニング(4mm)(粘着材仕様)                                            | 目視観察・引抜き後詳細調査                  |

表1.3-2 防食試験片の種類一覧表

| No. | 被 覆 の 種 類                                                        | 備 考 |
|-----|------------------------------------------------------------------|-----|
| 1   | 耐海水鋼(Cr-Al系)巻き(6mm)                                              | 2本  |
| 2   | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)     | 2本  |
| 3   | アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス | 2本  |
| 4   | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス | 2本  |
| 5   | エポキシ系レジンモルタルライニング(4mm)                                           | 2本  |
| 6   | ウレタンマスチックライニング(3mm)                                              | 2本  |
| 7   | モルタルライニング(47mm)+FRPカバー(3mm)                                      | 2本  |
| 8   | ポリウレタンゴムライニング(7mm)                                               | 2本  |
| 9   | ポリエチレンライニング(4mm)(粘着材仕様)                                          | 2本  |
| 10  | 無防食                                                              | 2本  |
| 11  | ガラスフレーク入りポリエステルライニング(1mm)                                        | 2本  |

注) 上記以外の試験片で、千葉沖で曝露試験を行った主な試験片の被覆の種類は次のとおりである。

- ・ステンレス巻(3mm)
- ・モネル巻(2mm)
- ・チタン巻(0.5mm)
- ・ペトロラタム+FRPカバー
- ・水中硬化型エポキシライニング(5mm)
- ・接着型ポリエチレン(4mm)
- ・アスファルトマスチックライニング
- ・不織布含浸エポキシテープ巻
- ・発泡ポリウレタンライニング
- ・ポリエチレンシュリンクチューブ

### (3) 摩耗対策用ガードリングの設置

試験場所が、漂砂現象が発生する場所であるため、裸鋼管杭が洗掘あるいは漂砂により杭肉厚の摩耗あるいは消耗が生じるかもしれないので、防止策の一つとして、杭の外周に摩耗対策用ガードリング設置した。

防食鋼管杭の防食範囲は、干満部以下T.P.-2.6mまでで、それより以深の水中部および海底土中の杭根入れ部までは、無防食の裸杭となっているので洗掘または漂砂の影響を受けることは十分考えられた。

そこで、裸鋼管杭( $\phi$ 609.4mm $\times$ t14 $\times$ L16000、材質SKK400)の外側に鞘状の鋼管( $\phi$ 914.4mm $\times$ t16 $\times$ L2000 材質SKK400)を被せることとし、鋼管杭打設時に鞘管をはめ込み杭と鞘管の隙間のクリアランスを均等に保

### (1) 補修防食被覆の範囲と環境区分

注) \*T.P. + 2 m、T.P. + 1 mの境界区分は、補修を行うための境界区分であり、飛沫部と干満部の境を意味するものではない。

第2次補修実施年月：昭和56年7月(1981) 部位：干満部の下部

防食被覆の選定：防食工事の目的が鋼管杭の保守であるので、国内での施工実績のあるものの中から阿字ヶ浦の自然条件下で施工可能で、かつ良好な防食性が期待できる防食被覆を網羅したもので防食工事を行い、その耐久性を調査することにより実用的な防食被覆を選定することを狙った。

防食被覆の施工：施工対象の鋼管杭は、4年間の曝露により厚い錆層に覆われそのうえ孔食がはなはだしく、通常の素地調整方法では除錆困難と考えられたので、まずハンマーケレンで厚錆を除去し、超高压水を併用したウォータージェットブラスト工法で食い込んだ錆と塩分を同時除去する方法を採用した。施工は、塗料等被覆材料の性状に応じ、エアスプレー、はけ塗り、手巻、張り付け、コテ塗り等所定の施工を行った。第1次補修の後不具合が生じた部分とL.W.L.付近を主に第2次補修を行っている。第2次補修は、ペトロラタムテープ+FRPカバーの防食被覆がメインとなっている。

海岸汀線側100m部分（既設の裸杭の補修防食）の最終の防食被覆の種類を表1.3-3に示す。

また、補修した鋼管杭の曝露状況を写真1.3-2に示す。ここに示した曝露状況の写真は、補修当初のものではなく引抜き撤去直前（21年間曝露）のものである

表1.3-3 海岸汀線側100m部分（補修用）の防食被覆の種類一覧表

| 計<br>No. | 鋼<br>管<br>杭<br>No. | 防 食 被 覆 の 種 類                             |                                  |                                     |                                                 | 備 考                                                                                                         |
|----------|--------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                    | 飛 沫 部                                     |                                  | 干 満 部                               |                                                 | 昭和48年3月(1973) から裸杭で供用開始。昭和51年度(1976) 飛沫部と干満部上部の補修実施。昭和56年7月(1981) 干満部株T.P.+1〜±0の追加補修実施。昭和51年度(1976) 以来21年経過 |
|          |                    | T.P.+4.0〜+2<br>昭和51年度(1976)施工             | T.P.+2〜+1.5<br>昭和51年度(1976)施工    | T.P.+1.5〜+1<br>昭和56年7月(1981)防食被覆を取替 | T.P.+1〜±0<br>昭和56年7月(1981)施工                    |                                                                                                             |
| Ps<br>0  | ①                  | 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型ビニル樹脂塗料(275μm)           | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料A(5mm)              |                                     | なし                                              | 目視調査                                                                                                        |
|          | ②                  | 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型ビニル樹脂塗料(275μm)           | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料A(5mm)              |                                     | なし                                              | 目視調査                                                                                                        |
| Ps<br>1  | ③                  | 無溶剤型エポキシ樹脂塗料+ポリウレタン樹脂塗料(380μm)            | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料A(5mm)              |                                     | なし                                              | 目視調査                                                                                                        |
|          | ④                  | 変性エポキシ樹脂塗料+エポキシ樹脂塗料(300μm)                | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料A(5mm)              |                                     | なし                                              | 目視調査                                                                                                        |
|          | ⑤                  | エポキシ樹脂塗料+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2(440μm)             | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B(5mm)・手塗り(押さえ用具使用) |                                     | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm(T.P.+0.5まで) | 目視調査、詳細調査                                                                                                   |
|          | ⑥                  | 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2(415μm)・エアレス塗装 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B(5mm)・手塗り(押さえ用具使用) |                                     | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm(T.P.+0.5まで) | 目視調査、詳細調査                                                                                                   |

|         |   |                                                                   |                                      |                                                                  |                                 |
|---------|---|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Ps<br>2 | ⑦ | 変性エポキシ樹脂塗料×3<br>(390 $\mu$ m)・エアレス塗装                              | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B(5mm)・手塗り<br>(押さえ用具使用) | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm                              | 目視調査、詳細調査<br>⑦⑧の間にアルミニウム合金陽極取付け |
|         | ⑧ | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+ETPカバー2mm<br>昭和56年7月ETPカバーをFRPカバー2.5mmと交換 |                                      | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm                              | 目視調査、詳細調査<br>⑦⑧の間にアルミニウム合金陽極取付け |
|         | ⑨ | 変性エポキシ樹脂塗料×3<br>(390 $\mu$ m)・エアレス塗装                              | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm                              | 目視調査                            |
|         | ⑩ | セメントモルタル(10cm)+FRPカバー3mm                                          |                                      | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm                              | 目視調査                            |
| Ps<br>3 | ⑪ | ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料(1000 $\mu$ m)<br>・圧送式エアスプレー塗装                 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス(5mm)<br>・こて塗り   | ペトロラタムペースト手塗+ペトロラタムテープ手巻+ETPカバー2.5mmカバー<br>昭和56年7月FRPカバー2.5mmと交換 | 目視調査、詳細調査                       |
|         | ⑫ | 無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料(500 $\mu$ m)                                   | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス(5mm)<br>・こて塗り   | ペトロラタムペースト手塗+ペトロラタムテープ手巻+ETPカバー2.5mmカバー<br>昭和56年7月FRPカバー2.5mmと交換 | 目視調査、詳細調査                       |
|         | ⑬ | ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料(1000 $\mu$ m)                                 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス(5mm)<br>・こて塗り   | ペトロラタムペースト手塗+ペトロラタムテープ手巻+ETPカバー2.5mmカバー<br>昭和56年7月FRPカバー2.5mmと交換 | 目視調査                            |
|         | ⑭ | 無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m)                                   | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス(5mm)<br>・こて塗り   | ペトロラタムペースト手塗+ペトロラタムテープ手巻+ETPカバー2.5mmカバー<br>昭和56年7月FRPカバー2.5mmと交換 | 目視調査                            |

|         |   |                                       |                                                                  |                                     |           |
|---------|---|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Ps<br>4 | ⑮ | 常温加硫型クロロプレンゴムシート(3mm)                 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料C(5mm)                                              | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm | 目視調査      |
|         | ⑯ | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロス入り(4mm)<br>・こて塗り | ペトロラタムペースト手塗+ペトロラタムテープ手巻+ETPカバー2.5mmカバー<br>昭和56年7月FRPカバー2.5mmと交換 | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー2.5mm | 目視調査、詳細調査 |

### 3. 3 曝露試験期間中の各種調査

#### (1) 沖側100m部分の防食鋼管杭の調査

防食鋼管杭の調査は、曝露開始以後毎年目視調査を主として実施してきた。

目視調査は、各杭ごと海側岸側の両面に分け、生物付着状況、防食被覆の外観観察結果等を展開図面に現地で記入する方法を採り、それを整理して一覧表を作成し、さらには劣化程度を予め定めた基準によって各杭の劣化状況を毎年評価し、経年変化が得られるようにした。

これらの各調査結果は、第2編に記述してある。

#### (2) 海岸汀線側100m部分の補修した鋼管杭の調査

昭和47年度(1972)に設置した鋼管杭に昭和51年(1976)現場施工した各種防食被覆の耐久性に関しては、第1次補修施工後、昭和52年(1977)から昭和55年(1980)まで毎年目視調査を行い、はがれ、われ、さび、その他について総合評価を行っている。

最終時点での評価で、再補修や追加して補修するべきものが生じたので、昭和56年(1981)第2次補修を実施している。

#### (3) 防食試験片(共同研究分)の調査

防食試験片は、本杭の試験の補充用の意味もあるので、長期曝露を予定している本杭に代わって、短期間の曝露を予定したものであった。

1種類につき2本ある試験片を曝露2～3年目に1本、4～5年目に1本を撤去して被覆のはく離調査や物性試験等を行った。

### 3. 4 20年経過の施設撤去と鋼管杭の引抜き

#### (1) 施設の撤去について

茨城県ひたちなか市阿字ヶ浦海岸に設置されている観測用栈橋は、建設省土木研究所により昭和48年度(1973)に汀線にほぼ直角に100m沖合まで建設された。その後昭和50年度(1975)には観測データの質・量の向上を目的として、さらに沖合に100m延伸され合計200mの観測用栈橋が建設された。

この漂砂観測用栈橋は、厳しい海象条件のもとで20年以上にわたり海象・漂砂の観測に使用されてきた。また、この栈橋は、共同研究の防食試験として下部工防食鋼管杭の曝露試験をその他を行う等多目的に使用されてきた。

延長200mに及ぶ漂砂観測用栈橋は、このように各種の調査試験や計測実験等多様な研究が行われていたが、この海域は、かねて常陸那珂港港湾区域と指定されおり、このたび、港湾施設のふ頭や栈橋工事が開始されることとなったので、漂砂観測用栈橋は撤去せざるを得ない事情が生じた。また、この栈橋の上部工トラスのエキスパンドメタル等部材の腐食が激しく、構造物として危険な状態となってきたので、このほど施設を解体し撤去し、もとの海岸の状態まで現状回復することとなったものである。

#### (2) 鋼管杭の引抜き撤去について

防食鋼管杭は、その全長が調査対象となっているので、土中に貫入している根入れ部まで全長を引抜いて欲しいとの希望があった。しかし鋼管杭の撤去工法として経済的な工法が採用できるかどうか検討した。

そのため、平成8年度（1996）漂砂観測用栈橋撤去工法検討委員会が設けられ、工事発注担当部局と調査研究担当部局および学識経験者、防食実務担当者、鋼管杭引抜き作業経験者等が委員となり、慎重に検討が進められた。また、海上保安庁の承認がなければ工事発注が不可能であるので、その意向も質す必要があった。

種々審議、折衝の結果、海底面下約2mの所で水中切断してバイプロハンマで鋼管杭を引抜いて撤去することに決着した。

このような経過を経て、図1.2-1に示した切断位置で、水中切断のうえ鋼管杭を引抜く工法とすることが決定し、平成9年度（1997）引抜き工事が行われた。

工事は、漂砂観測用栈橋に沿って足場用仮栈橋を設置し、重機を用いて上部工トラス桁の撤去から始まり、先端の橋脚部の防食鋼管杭から逐次、杭管内にカッターを挿入し所定の位置で水中切断を行い、バイプロハンマで杭を振動させながら防食被覆ははく離しないよう注意して、ゆっくりと引抜きを行った。杭先端根入れ部は海底中に残置した。

引抜いた防食鋼管杭は、予め定められたとおり、詳細調査を行う杭と現場で廃棄処分する杭とに分けて阿字ヶ浦海岸に仮置した。

写真1.3-3に阿字ヶ浦海岸に引き揚げられた防食鋼管杭の状況を示す。

その後、詳細調査を行う鋼管杭については所要の位置で切断し、それぞれ詳細調査担当部門のところへ、運搬移動した。詳細調査を行わない鋼管杭については、トラスや桁材等その他の部材とともに廃棄処分された。

### （3）引抜いた鋼管杭の切断長切断位置等

鋼管杭を引抜くため、杭上部と杭下部の2箇所を切断した。栈橋上部工の撤去のためには、杭上部を切断しなければならないが、防食被覆の上端を痛めないように配慮したため、橋脚ごとに切断位置が検討された。

また、杭下部は橋脚ごとに、当初の予定高より以深の海底面下2～3mの位置で水中切断して引抜き、残余は残置した。

引抜いた鋼管杭の切断位置等を表1.3-4に示す。

## 3. 5 引抜き鋼管杭の調査分類

### （1）新設の防食鋼管杭（沖側100m）

引抜いた防食鋼管杭は、曝露した防食杭全数を詳細調査するのが本来であるが、種々の制約のため、現地目視調査の結果に基づき、防食被覆の外見が健全性を示し、今後の防食方法の参考になりうるであろうと判断された被覆の種類のものに限って詳細調査を実施した。

判断基準は以下のとおりである。

- ・詳細調査する防食杭：これまでの各種曝露試験で良好な結果を出している被覆種で、今後の技術的参考資料となるもの。
- ・廃棄するもの：防食技術の進歩により、現在使われていないもの。今後の技術進歩に寄与しないと思われるもの。

3. 1の表1.3-1 沖側100m部分の防食鋼管杭の種類一覧表の備考欄に個々の調査内容の区分を示してある。詳細調査の結果については、第2編で詳述する。

### （2）既設鋼管杭の補修試験（汀線側100m）

引抜いた防食補修鋼管杭については、現地目視調査の結果に基づき、防食被覆の外見が健全性を示し、今後の現場での補修防食工法の参考になりうるであろうと判断された被覆の種類のものに限って詳細調査を実施することとした。

3. 1の表1.3-3 海岸汀線側100m部分の防食被覆の種類一覧表の備考欄に詳細調査を実施するものを表示した。

詳細調査の結果については、第3編で詳述する。

### 3. 6 設置以来の曝露試験の経過表

第1編の1. 長期曝露試験の開始から3. 曝露試験経過までを経過表として簡単にまとめたものを表1.3-5に示す。

表1.3-4 引抜いた鋼管杭の切断位置等

|               | 橋脚<br>番号 | 杭  | 杭全長<br>(m) | 上部切断位置<br>(cm) | 下部切断位置<br>括弧内は予定高 (cm) | 引抜き長<br>(cm) | 杭径<br>(mm) | 肉厚<br>(mm) |
|---------------|----------|----|------------|----------------|------------------------|--------------|------------|------------|
| 海岸<br>汀線<br>側 | Ps0      | ①  | 1 0        | T. P. +170     | 切断せず引抜                 | 770          | 355. 6     | 11. 4      |
|               |          | ②  | 1 0        | T. P. +170     | 切断せず引抜                 | 770          | 355. 6     | 11. 4      |
|               | Ps1      | ③  | 1 4        | T. P. +355     | T. P. -423 (-370)      | 778          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ④  | 1 4        | T. P. +355     | T. P. -423 (-370)      | 778          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ⑤  | 1 4        | T. P. +355     | T. P. -423 (-370)      | 778          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ⑥  | 1 4        | T. P. +355     | T. P. -422 (-370)      | 777          | 406. 4     | 12. 7      |
|               | Ps2      | ⑦  | 1 6        | T. P. +330     | T. P. -492 (-370)      | 822          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ⑧  | 1 6        | T. P. +330     | T. P. -492 (-370)      | 822          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ⑨  | 1 6        | T. P. +330     | T. P. -492 (-370)      | 822          | 406. 4     | 12. 7      |
|               |          | ⑩  | 1 6        | T. P. +330     | T. P. -492 (-370)      | 822          | 406. 4     | 12. 7      |
|               | Ps3      | ⑪  | 1 8        | T. P. +330     | T. P. -534 (-430)      | 864          | 508        | 12. 7      |
|               |          | ⑫  | 1 8        | T. P. +330     | T. P. -534 (-430)      | 864          | 508        | 12. 7      |
|               |          | ⑬  | 1 8        | T. P. +330     | T. P. -534 (-430)      | 864          | 508        | 12. 7      |
|               |          | ⑭  | 1 8        | T. P. +330     | T. P. -534 (-430)      | 864          | 508        | 12. 7      |
|               | Ps4      | ⑮  | 1 9        | T. P. +380     | T. P. -556 (-450)      | 936          | 609. 6     | 12. 7      |
|               |          | ⑯  | 1 9        | T. P. +380     | T. P. -556 (-450)      | 936          | 609. 6     | 12. 7      |
| 沖<br>側        | Ps5      | 1' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -555 (-450)      | 895          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 2  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -558 (-450)      | 898          | 609. 6     | 14         |
|               | Ps6      | 3  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -590 (-500)      | 930          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 4  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -590 (-500)      | 930          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 5  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -590 (-500)      | 930          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 6  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -590 (-500)      | 930          | 609. 6     | 14         |
|               | Ps7      | 2' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -655 (-550)      | 995          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 7  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -653 (-550)      | 993          | 609. 6     | 14         |
|               |          | 8  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -653 (-550)      | 993          | 600. 0     | 14         |
|               |          | 9  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -655 (-550)      | 995          | 609. 6     | 14         |
|               | Ps8      | 3' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -710 (-600)      | 1050         | 609. 6     | 14         |
|               |          | 4' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -715 (-600)      | 1055         | 609. 6     | 14         |
|               |          | 5' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -712 (-600)      | 1052         | 609. 6     | 14         |
|               |          | 6' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -710 (-600)      | 1050         | 609. 6     | 14         |
|               | Ps9      | 1  | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -713 (-600)      | 1053         | 609. 6     | 14         |
|               |          | 7' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -710 (-600)      | 1050         | 609. 6     | 14         |
|               |          | 8' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -715 (-600)      | 1055         | 600. 0     | 14         |
|               |          | 9' | 1 6        | T. P. +340     | T. P. -715 (-600)      | 1055         | 609. 6     | 14         |

表1.3-5 阿字が浦漂砂観測用栈橋を使用した曝露試験の経過表

| 海岸江線側100m栈橋 鋼管杭                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 沖側100m栈橋 鋼管杭                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・新設 昭和47年度(1972)着工<br/>昭和48年3月(1973)完成<br/>当初、延長100mで供用開始。</li> <li>・供用開始当初は、栈橋橋脚は裸鋼管杭が使用され、無防食の裸杭であった。</li> <li>・その後4年間(昭和48～51)で、平均1mmの肉厚減少を観測したので、建設省土木研究所化学研究室で補修を検討。</li> <li>・1次補修防食施工(補修被覆)<br/>飛沫部・干満部の塗覆装と<br/>没水部の電気防食<br/>昭和51年度(1976)施工</li> <li>・その後毎年昭和55年まで4回調査実施</li> <li>・発表：鋼橋塗装Vol.8, No.4(昭和55年12月(1980年)) 森、西島、橋本ほか</li> <li>・波浪漂砂等での損傷により、2次補修防食を施工した。<br/>2次防食施工<br/>追加補修被覆T.P.+1～T.P.O<br/>干満部の防食被覆(ペトロラタム+FRP) 昭和56年7月(1981年)施工</li> <li>・平成8年(1996)、栈橋撤去工法検討委員会開催(種々検討の結果、杭全長の引抜きを取り止め各杭の海底面下約2m位置で水中切断して引抜くこととなった。)<br/>(残部は海底残置で海上保安庁と合意)<br/>(水中切断は、沖側100mも同じ)</li> <li>・平成10年3月17日(1998)、引抜き直後の現地見学会実施、当初補修開始(昭和51年度)以来満21年経過。</li> <li>・その後、詳細調査等に入り現在に至る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・共同研究：昭和48年度(1973)～51年度(1976)総合技術開発プロジェクト(略称、総プロ)<br/>「海洋構造物建設技術の開発」の小課題<br/>「構造材料の防食技術の開発」スタート。</li> <li>・当初100mの栈橋を200mに延長する案発生。</li> <li>・建設省土木研究所+国土開発技術研究センター+鋼管杭協会の3者の共同研究。<br/>昭和48年度(1973)文献調査等<br/>昭和49年度(1974)千葉沖曝露試験着手<br/>昭和50年度(1975)阿字が浦曝露試験着手</li> <li>・昭和50年(1975年)栈橋工事着工<br/>昭和51年2月(1976年)完成、9種類の防食仕様による新設した防食鋼管杭と10種類の防食仕様による試験片の曝露開始。</li> <li>・参考：千葉沖曝露試験は、昭和50年3月(1975年)完成後曝露開始(実杭と試験片)</li> <li>・防食ぐい開発委員会を設置<br/>毎年目視調査等実施(千葉・阿字が浦)</li> <li>・その後昭和52(1977)～61(1986)年度は土木研究所からの受託と鋼管杭協会の費用で調査実施</li> <li>・昭和61年度(1986年)までで調査終了。<br/>(その後協会では、成果の纏めや基準化作業に入る)その間、国内外に発表。</li> <li>・防食指針作成(昭和51年度)</li> <li>・防食指針見直し(平成2年度)</li> <li>・参考：千葉沖は、曝露10年経過後鋼管杭を引抜き撤去し、詳細調査実施。<br/>(昭和61年度実施)(報告書その12)</li> <li>・平成10年3月17日(1998)、引抜き直後の現地見学会実施、当初暴露開始(昭和52年2月)以来満22年経過。</li> <li>・その後、詳細調査等に入り現在に至る。</li> </ul> |

#### 4. 引抜いた鋼管杭の調査方法

##### 4. 1 沖側100m新設の防食鋼管杭の調査（全数調査と選別調査）

###### （1）調査方法

外観目視、詳細調査は、本来全数調査をするべきであるが、3. 5に述べた事情により、詳細調査は抽出調査とせざるを得なかった。

したがって、全数調査としては、立ち姿での目視調査が主である。目視調査の結果から、詳細調査を必要と考えられた被覆の種類を選別することとした。

防食鋼管杭ごとの目視調査のみのもの詳細調査を行うものの選別結果は、3. 1の表1.3-1の備考欄に示してある。調査にあたっては、1. 4（4）阿字ヶ浦曝露試験の試験条件の特殊性で述べた条件を踏まえて調査にあたった。防食鋼管杭の引抜き直前の立ち姿状態の外観は、3. 2の写真1.3-1に示してある。

外観調査では、20年間の長期にわたる曝露のため、阿字ヶ浦の高い波浪と豊富な飛沫の飛散を受け、上部からのもらい錆で全体的に赤褐色を呈しており、一部に被覆部分の上端からのしぶきの浸入によりはく離が生じているものもあった。また、一部に曝露中に外傷を受けそこからの内部劣化が予想されるものもあった。

外観目視調査結果および詳細調査結果については、第2編で述べる。

###### （2）サンドエロージョンの調査について

阿字ヶ浦の曝露地域は、千葉での内湾雰囲気との曝露環境と異なり、波浪が高くしかも漂砂現象があつて、海底2m厚の砂を年2回沖合から海岸・海岸から沖合へ大量移動するという、外洋雰囲気中でも、より激しい曝露環境であるので、通常の海域での曝露試験と異なる試験として、サンドエロージョン現象を鋼管杭の腐食状況によって把握しようと計画し、栈橋設置工事の時点で準備された。

Ps9の橋脚に使う4本の杭にガードリングをはめ込み、海底に設置した。ガードリングは、防食杭の杭径より大径のものとした。

ガードリング：φ914.4×t16×L2000mm

防食鋼管杭：φ609.6×t14×L16000mm

22年経過後の状況を把握するため、ガードリング2本、ガードリングでサンドエロージョンが防止できたと思われるPs9に用いた杭下端部2本、および比較材として、サンドエロージョンを受けたと思われるPs5の杭下端部2本を使用して計測した。

摩耗減厚と漂砂の関係に関する解析結果は、第4編で述べる。

引き揚げたガードリングの表面状態を写真1.4-1に示す。また、ガードリングの肉厚測定用の位置決め作業を写真1.4-2に示す。

##### 4. 2 汀線側100m補修した既設鋼管杭の調査（全数調査と選別調査）

###### （1）調査方法

外観目視、詳細調査は、本来全数調査をするべきであるが、3. 5に述べた事情により、詳細調査は抽出調査とせざるを得なかった。

したがって、全数調査としては、立ち姿での目視調査が主である。目視調査の結果から、詳細調査を必要と考えられた被覆の種類を選別することとした。防食鋼管杭ごとの目視調査のみのもの、詳細調査を行うものの選別結果は、3. 2の表1.3-3の備考欄に示してある。

補修した鋼管杭の引抜き直前の立ち姿状態の外観は、3. 2の写真1.3-2に示してある。

外観調査では、20年間の長期にわたる曝露のため、阿字ヶ浦の高い波浪と豊富な飛沫の飛散を受け、上部からのもらい錆で全体的に赤褐色を呈しており、一部に補修被覆部分が消失しているものがありしぶきの浸入によりはく離が生じているものもあった。外殻的機能のFRPカバーは、張合わせ部をボルトナット式で緊結しているが、激烈な波浪衝撃で離脱しているものがあり、外洋性で波浪の激しい海域での用法に一考を要する。

外観目視調査結果および詳細調査結果については、第3編で述べる。

## （２）引抜き杭内面の閉塞状態目視結果

鋼管杭の支持力は、管外面の摩擦力と、管内に充填された土砂による先端閉塞効果により得られるので、海岸地帯に打設されたPsOの杭をバイブロハンマで振動引抜きを行い、その杭を縦方向に切断し、2分割して内部に詰まっている土砂の充填状況を観察するとともに、杭内面の腐食状況を目視観察した。

分割したための土砂の圧密開放により計測は不可能であったが、杭内面に付着残存している土砂分の状況から十分な先端閉塞状態が予測でき、また鋼管杭内面の腐食状態は、ほとんど腐食がなく引抜き後の浅い錆がみられるのみであった。

引抜き杭の内面の状況を写真1.4-3 に示す。

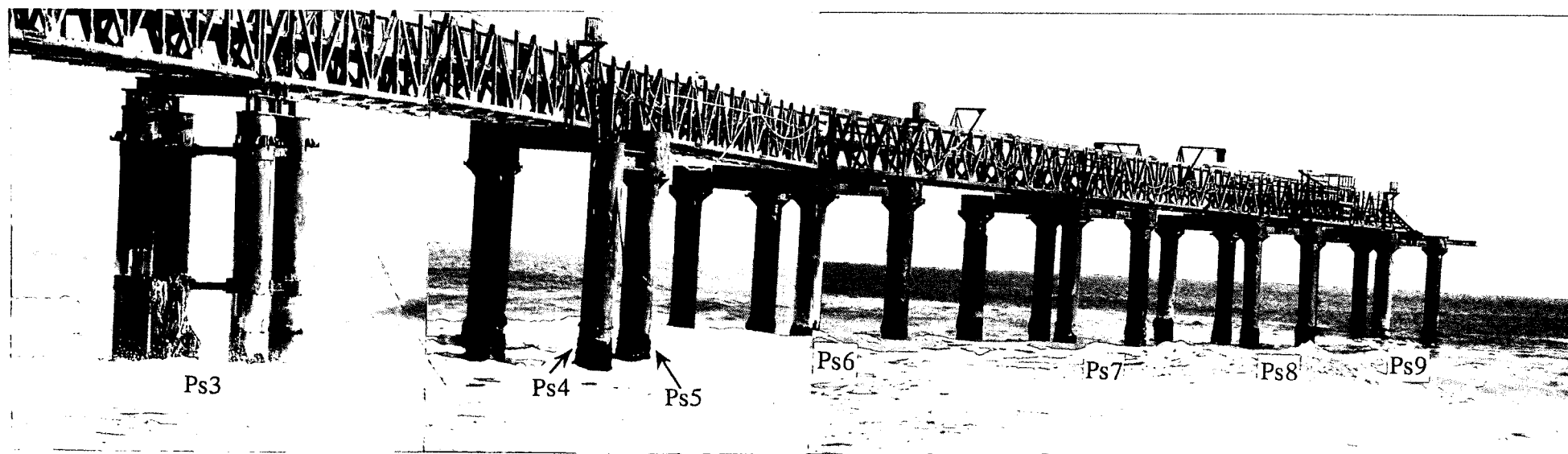
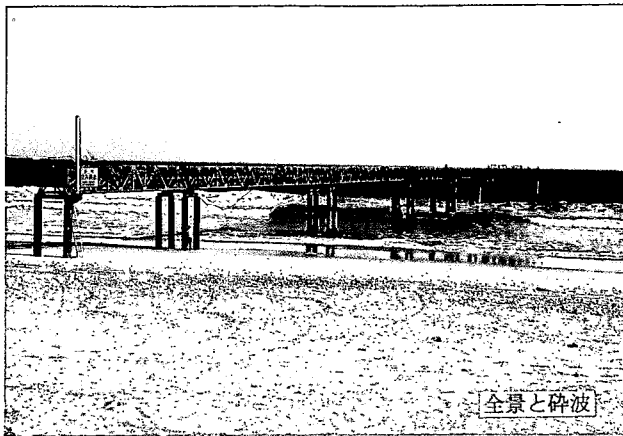


写真 1.2-1 観測用栈橋現況 (20 年経過)



全景と碎波

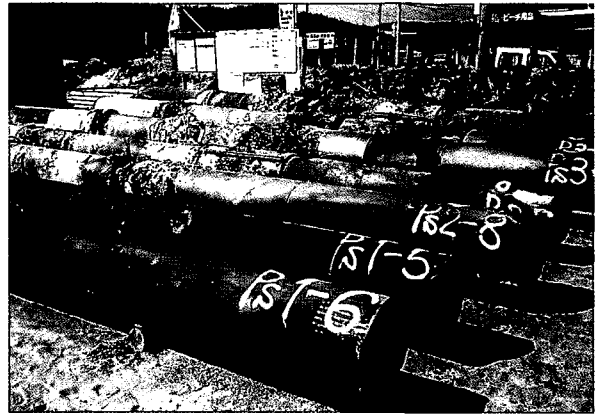


写真1. 3-3(1) 引抜き直後(阿字ヶ浦海岸)

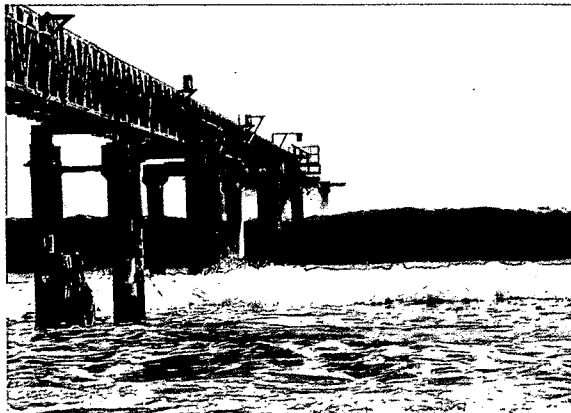


写真1. 3-3(2) FRP被覆(左端の疵は引抜き時のチャック疵)

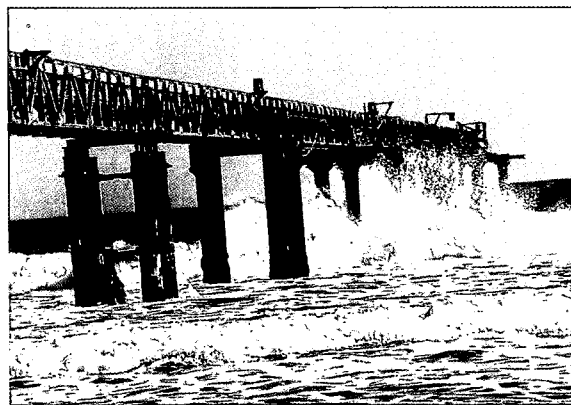


写真1. 2-2 標砂観測用栈橋付近の各種の波

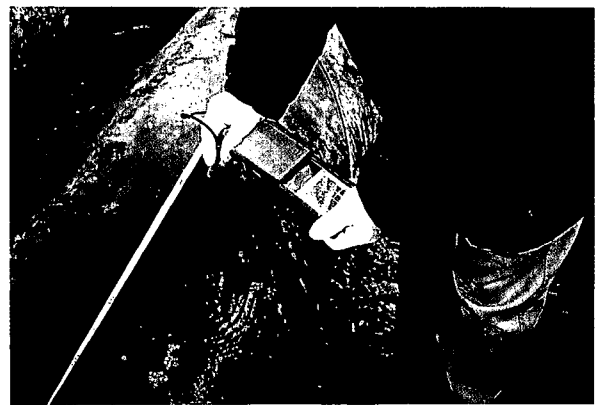


写真1. 3-3(3) 塗装被覆(膜厚計測)

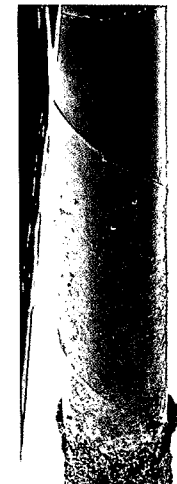
|            | Ps 5                                                                              | Ps 5                                                                              | Ps 6                                                                              | Ps 6                                                                              | Ps 6                                                                                | Ps 6                                                                                |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|            | No.2                                                                              | No.1'                                                                             | No.4                                                                              | No.3'                                                                             | No.6                                                                                | No.5                                                                                |
|            |  |  |  |  |  |  |
| 飛沫部<br>干満部 | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ )+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3)                                 | 耐海水鋼巻き(6mm)                                                                       | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ )+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3、ガラス繊維入り)                            | アルミ溶射(100 $\mu$ )+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3、ガラス繊維補強)                               | ウレタンマチックライニング(3mm、骨材入り)                                                             | レジン硬化体(エポキシ系モルタル4~6mm)                                                              |

写真 1.3-1(1) 沖側 100mの鋼管杭の状況

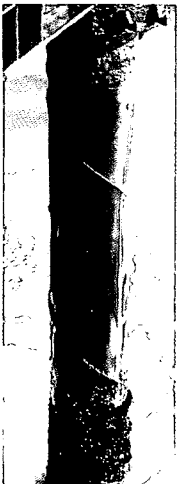
|            | Ps 7                                                                                | Ps 7                                                                                | Ps 7                                                                                | Ps 7                                                                                | Ps 8                                                                                  | Ps 8                                                                                  |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            | No.8                                                                                | No.7                                                                                | No.2'                                                                               | No.9                                                                                | No.3'                                                                                 | No.4'                                                                                 |
|            |  |  |  |  |  |  |
| 飛沫部<br>干満部 | ポリウレタンゴムライニング(7mm)                                                                  | セメントモルタル(47mm)+ポリエステルFRP(3mm)                                                       | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ )+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3)                                   | ポリエチレン押し出しライニング(4mm)                                                                | アルミ溶射(100 $\mu$ )+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3、ガラス繊維補強)                                   | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ )+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ ×3、ガラス繊維入り)                                |

写真 1.3-1(2) 沖側 100mの鋼管杭の状況

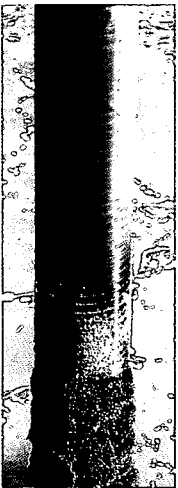
|            | Ps 8<br>No.5'                                                                     | Ps 8<br>No.6'                                                                     | Ps 9<br>No.7'                                                                     | Ps 9<br>No.1                                                                       | Ps 9<br>No.9'                                                                       | Ps 9<br>No.8'                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|            |  |  |  |  |  |  |
| 飛沫部<br>干満部 | レジン硬化体(エポキシ<br>系モルタル4~6mm)                                                        | ウレタンマステックライ<br>ニング(3mm, 骨材入り)                                                     | セメントモルタル<br>(47mm)+ポリエステル<br>FRP(3mm)                                             | 無処理                                                                                | ポリエチレン押し出しラ<br>イニング(4mm)                                                            | ポリウレタンゴムライニ<br>ング(7mm)                                                              |

写真 1.3-1(3) 沖側 100mの鋼管杭の状況

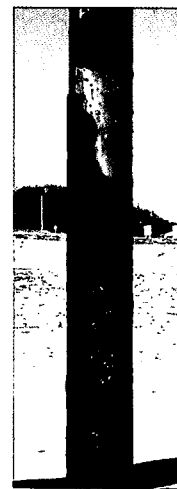
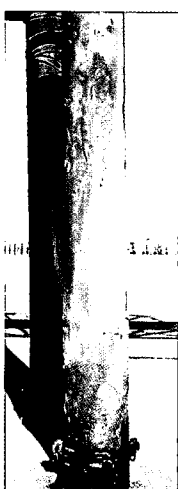
|     | Ps 0<br>No.1                                                                        | Ps 0<br>No.2                                                                        | Ps 1<br>No.4                                                                         | Ps 1<br>No.3                                                                         | Ps 1<br>No.5                                                                          |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     |  |  |  |  |  |
| 飛沫部 | 有機ジンク<br>+厚膜ビニル(280 $\mu$ )                                                         | 有機ジンク<br>+厚膜ビニル(280 $\mu$ )                                                         | 変性エポキシ<br>+エポキシ(330 $\mu$ )                                                          | 無溶剤エポキシ<br>+ウレタン(340 $\mu$ )                                                         | エポキシプライマー<br>+厚膜エポキシ×2(370 $\mu$ )                                                    |
| 干満部 | 水中硬化エポキシA<br>(2.5mm)                                                                | 水中硬化エポキシA<br>(2.5mm)                                                                | 水中硬化エポキシA<br>(2.5mm)                                                                 | 水中硬化エポキシA<br>(2.5mm)                                                                 | 水中硬化エポキシB<br>(4.7mm)                                                                  |

写真 1.3-2(1) 汀線側 100mの鋼管杭の状況

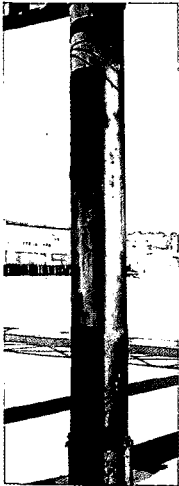
|     | Ps 1                                                                              | Ps 2                                                                              | Ps 2                                                                              | Ps 2                                                                               | Ps 2                                                                                | Ps 3                                                                                |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|     | No.6                                                                              | No.7                                                                              | No.8                                                                              | No.9                                                                               | No.10                                                                               | No.11                                                                               |
|     |  |  |  |  |  |  |
| 飛沫部 | 有機ジンク+厚膜エポキシ×2(380 $\mu$ )                                                        | 変性エポキシ×3(380 $\mu$ )                                                              | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                   | 変性エポキシ×3(380 $\mu$ )                                                               | セメントモルタル(10cm)+FRPカバー                                                               | ガラスフレーク入りポリエステル(1100 $\mu$ )                                                        |
| 干満部 | 水中硬化エポキシB(4.7mm)                                                                  | 同上、一部にFRPカバーあり                                                                    | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                   | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                    | セメントモルタル(10cm)+FRPカバー                                                               | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                     |

写真 1. 3-2(2) 汀線側 100mの鋼管杭の状況

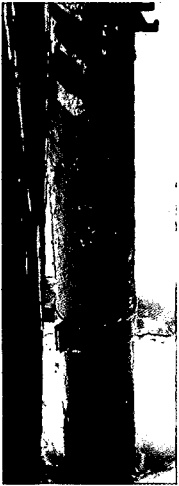
|     | Ps 3                                                                                | Ps 3                                                                                | Ps 3                                                                                | Ps 4                                                                                 | Ps 4                                                                                  |  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|
|     | No.12                                                                               | No.13                                                                               | No.14                                                                               | No.15                                                                                | No.16                                                                                 |  |
|     |  |  |  |  |  |  |
| 飛沫部 | 無溶剤型厚膜タールエポキシ(1180 $\mu$ )                                                          | ガラスフレーク入りポリエステル(1100 $\mu$ )                                                        | 無溶剤型厚膜タールエポキシ(330 $\mu$ )                                                           | 常温加硫型クロロプレンゴムシート(3mm)                                                                | 水中硬化エポキシD(4mm,ガラス入り)                                                                  |  |
| 干満部 | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                     | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                     | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                     | 水中硬化エポキシC(5mm)                                                                       | ペトラタムテープ+FRPカバー                                                                       |  |

写真 1. 3-2(3) 汀線側 100mの鋼管杭の状況



写真 1.4-1 引き上げたガードリングの表面状態



写真 1.4-2 ガードリング肉厚測定位置決め作業



写真 1.4-3 引抜き杭の内面の状況

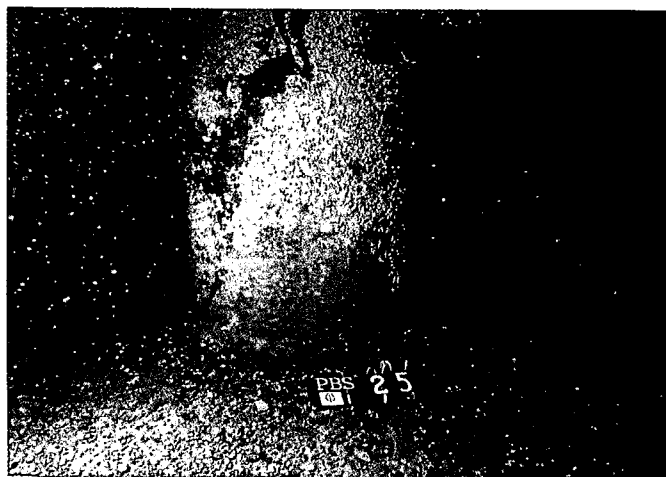


写真 4.3-1 漂砂による摩耗と錆の発生の一例

## 第2編 新設防食鋼管杭の曝露試験の調査結果（沖側 100m）

### 1. 調査概要

#### 1. 1 調査目的と経緯および調査分担

##### (1) 調査目的

阿字ヶ浦沖曝露試験は、昭和 51 年（1976）2 月以来、茨城県那珂湊市阿字ヶ浦沖に設置された漂砂観測用栈橋の基礎杭として用いた防食鋼管杭と各種防食被覆試験片を対象に共同研究として実施されてきた。平成 10 年（1998）に漂砂観測用栈橋が撤去されるまで、22 年間にわたり曝露試験を行っていた各種防食鋼管杭（18 本）の防食被覆の劣化状況を、目視により観察するほか詳細調査を行い、これら 22 年間曝露された鋼管杭の腐食挙動と防食被覆の特性に関する知見を得ることを目的とした。

##### (2) 調査分担

本研究において、現地調査は建設省土木研究所が詳細調査は鋼管杭協会が主に担当し、平成 10 年（1998）度約 1 年間で調査した。詳細調査は、鋼管杭外観調査を主とした一次調査と小試験体を採取して行う二次調査にわけて実施した。

#### 1. 2 調査内容

##### (1) 鋼管杭の種類

現地調査は表 2. 1-1 に示す全種類の防食鋼管杭を対象にし、詳細調査を行うものは事前の現地調査により予め決定し、同表の備考欄に\*印で示した。

調査方法が同じものにまとめて次のようにグループ分けをした（表 2. 1-2）。

詳細調査を行った防食鋼管杭の仕様を表 2. 1-3(1)～(2)に示す。

表 2. 1-1 現地調査対象防食鋼管杭の種類

| ピア<br>No. | 杭<br>No. | 被 覆 の 仕 様<br>(T. P. +3.4m～-2.6m)                                  | 備考 |
|-----------|----------|-------------------------------------------------------------------|----|
| Ps5       | 1'       | 耐海水鋼(Cr-Al 系) (6mm) 巻き                                            | *  |
|           | 2        | 無機 ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)     | *  |
| Ps6       | 3        | アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス     | *  |
|           | 4        | 無機 ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス |    |
|           | 5        | エポキシ系レジンモルタルライニング (4mm)                                           |    |
|           | 6        | ウレタンマスチックライニング (3mm, 骨材入り)                                        |    |
| Ps7       | 7        | セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)                             | *  |
|           | 8        | ポリウレタンゴムライニング (7mm)                                               |    |
|           | 9        | ポリエチレン押出ライニング (4mm)                                               |    |
|           | 2'       | 無機 ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)     |    |
| Ps8       | 3'       | アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス     | *  |
|           | 4'       | 無機 ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス |    |
|           | 5'       | エポキシ系レジンモルタルライニング (4mm)                                           |    |
|           | 6'       | ウレタンマスチックライニング (3mm, 骨材入り)                                        |    |
| Ps9       | 1        | 無防食                                                               | *  |
|           | 7'       | セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)                             | *  |
|           | 8'       | ポリウレタンゴムライニング (7mm)                                               | *  |
|           | 9'       | ポリエチレン押出ライニング (4mm) (粘着剤仕様)                                       | *  |

表 2.1-2 調査対象杭の調査方法によるグループ分け

| 種 類                  | 数   | 被覆の仕様と杭の記号                                                                               |
|----------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 無防食鋼管杭               | 1 本 | 炭素鋼 (Ps9-1)                                                                              |
| 耐海水鋼 (Cr-Al 系) 巻き鋼管杭 | 1 本 | 耐海水鋼 (Cr-Al 系) 巻き (Ps5-1')                                                               |
| 塗覆装鋼管杭               | 4 本 | 無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料 (Ps5-2, Ps7-2')<br>無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス (Ps6-4, Ps8-4') |
| セメントモルタルライニング鋼管杭     | 2 本 | セメントモルタルライニング+ポリエステル F R P カバー (Ps7-7, Ps9-7')                                           |
| 有機ライニング鋼管杭           | 4 本 | ポリウレタンゴムライニング (Ps7-8, Ps9-8')<br>ポリエチレン押し出しライニング (粘着剤仕様) (Ps7-9, Ps9-9')                 |

表 2.1-3(1) 詳細調査対象の防食鋼管杭の被覆の仕様 (阿字ヶ浦)

| 試験杭<br>No.  | 被 覆 の 種 類                                    | 被 覆 の 仕 様                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |        |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
|-------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|-----|-----|------|---------|------|-------|---------|-------|----|-------|----|-------|----|-------|---|-------|----|-------|
| 9-1         | 無防食                                          | STK 4 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| 5-1'        | 耐海水鋼(Cr-Al系)巻き(6mm)                          | APS 2 0 C<br><table><tr><td>成分</td><td>(%)</td><td>成分</td><td>(%)</td></tr><tr><td>C</td><td>0.100</td><td>S</td><td>0.008</td></tr><tr><td>Si</td><td>0.440</td><td>Cu</td><td>0.180</td></tr><tr><td>Mn</td><td>0.460</td><td>Cr</td><td>3.980</td></tr><tr><td>P</td><td>0.039</td><td>Al</td><td>0.420</td></tr></table> | 成分     | (%)     | 成分  | (%) | C    | 0.100   | S    | 0.008 | Si      | 0.440 | Cu | 0.180 | Mn | 0.460 | Cr | 3.980 | P | 0.039 | Al | 0.420 |
| 成分          | (%)                                          | 成分                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | (%)    |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| C           | 0.100                                        | S                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.008  |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| Si          | 0.440                                        | Cu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0.180  |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| Mn          | 0.460                                        | Cr                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3.980  |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| P           | 0.039                                        | Al                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0.420  |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| 5-2<br>7-2' | 無機ジンクリッチペイント(75μm)<br>+ タールエポキシ樹脂塗料(300μm×3) | 1. 下地処理: グリッドブラスト SIS Sa 2.5<br>2. 使用材料: ジンクリッチプライマー 樹脂 75μm×1層<br>タールエポキシ 300μm×3層<br><br>3. 施工方法: エアレススプレー<br>4. 膜厚測定結果<br><table><tr><td>試験杭No.</td><td>プライマー膜厚</td><td>全膜厚</td></tr><tr><td>5-2</td><td>71μm</td><td>1,040μm</td></tr><tr><td>7-2'</td><td>72μm</td><td>1,100μm</td></tr></table>                        | 試験杭No. | プライマー膜厚 | 全膜厚 | 5-2 | 71μm | 1,040μm | 7-2' | 72μm  | 1,100μm |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| 試験杭No.      | プライマー膜厚                                      | 全膜厚                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |        |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| 5-2         | 71μm                                         | 1,040μm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |
| 7-2'        | 72μm                                         | 1,100μm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |         |     |     |      |         |      |       |         |       |    |       |    |       |    |       |   |       |    |       |

表2.1-3(2) 詳細調査対象の防食鋼管杭の被覆の仕様 (阿字ヶ浦)

| 試験杭<br>No.  | 被 覆 の 種 類                                                        | 被 覆 の 仕 様                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
|-------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|-----|-------|------------|---------------|------|------------|---------------|
| 6-4<br>8-4' | 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ )<br>+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラス | 1. 下地処理: グリッドブラスト SIS Sa 2.5<br>2. 使用材料: ジンクプライマー 樹脂 75 $\mu$ m $\times$ 1層<br>エポキシ 300 $\mu$ m $\times$ 3層<br>ガラスクロス 幅100mm(ラップ50mm)<br><br>3. 施工方法: エアレススプレー<br>4. 膜厚測定結果<br><table><tr><th>試験杭No.</th><th>プライマー膜厚</th><th>全膜厚</th></tr><tr><td>6-4</td><td>63<math>\mu</math>m</td><td>1,100<math>\mu</math>m</td></tr><tr><td>8-4'</td><td>65<math>\mu</math>m</td><td>1,100<math>\mu</math>m</td></tr></table> | 試験杭No. | プライマー膜厚 | 全膜厚 | 6-4   | 63 $\mu$ m | 1,100 $\mu$ m | 8-4' | 65 $\mu$ m | 1,100 $\mu$ m |
| 試験杭No.      | プライマー膜厚                                                          | 全膜厚                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 6-4         | 63 $\mu$ m                                                       | 1,100 $\mu$ m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 8-4'        | 65 $\mu$ m                                                       | 1,100 $\mu$ m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 7-7<br>9-7' | セメントモルタルライニング(47mm)<br>+ポリエステルFRPカバー(3mm)                        | 1. 使用材料: ポリエステル FRP 型枠<br>$\phi$ 709 $\times$ t3 $\times$ L6000mm<br>ナイロン製リベットにて円周接合<br>FRP製スペーサー、スタッドジザベル使用<br>SS41製下端受皿取付け(ボルト止め)<br>2. 施工方法: 型枠固定→モルタル注入(47mm)                                                                                                                                                                                                                                                   |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 7-8<br>9-8' | ポリウレタンゴムライニング(7mm)                                               | 1. 下地処理: ショットブラスト SIS Sa 2.5<br>2. 使用材料: フェノール系プライマー(数 $\mu$ m)<br>ポリウレタンゴムポリエーテル系(P TMG型)<br>3. 膜厚測定結果: 約7mm(ただしビード部上は約4mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                        |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 7-9<br>9-9' | ポリエチレン押出しライニング(4mm)<br>(粘着剤使用)                                   | 1. 下地処理: ブラッシング<br>2. 使用材料: アンダーコート アスファルトゴム系<br>ポリエチレン<br>杭No. 7-9 高密度ポリエチレン(カーボンブラック2.5%入り)<br>杭No. 9-9' 低密度ポリエチレン(カーボンブラック2.5%入り)<br>3. 膜厚測定結果<br><table><tr><th>試験杭No.</th><th>全膜厚</th></tr><tr><td>7-9</td><td>4.2mm</td></tr><tr><td>9-9'</td><td>4.6mm</td></tr></table>                                                                                                                                     | 試験杭No. | 全膜厚     | 7-9 | 4.2mm | 9-9'       | 4.6mm         |      |            |               |
| 試験杭No.      | 全膜厚                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 7-9         | 4.2mm                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |     |       |            |               |      |            |               |
| 9-9'        | 4.6mm                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |        |         |     |       |            |               |      |            |               |

## (2) 形状・寸法・防食範囲

防食鋼管杭の形状・寸法および防食範囲を図 2.1-1 に示す。供試鋼管の寸法は、 $\phi 609.6 \times t14 \times L16,000\text{mm}$  で、防食範囲は干満部を中心として 6.0m である。

調査対象の防食被覆鋼管杭は、防食範囲を挟んで防食被覆上端直上部と下端の海底面直下の無防食部で切断した。無防食鋼管杭は、土中深さ約 1m の位置で切断し、さらに 50~70cm 間隔で現地で切断、運搬し試験に供した。

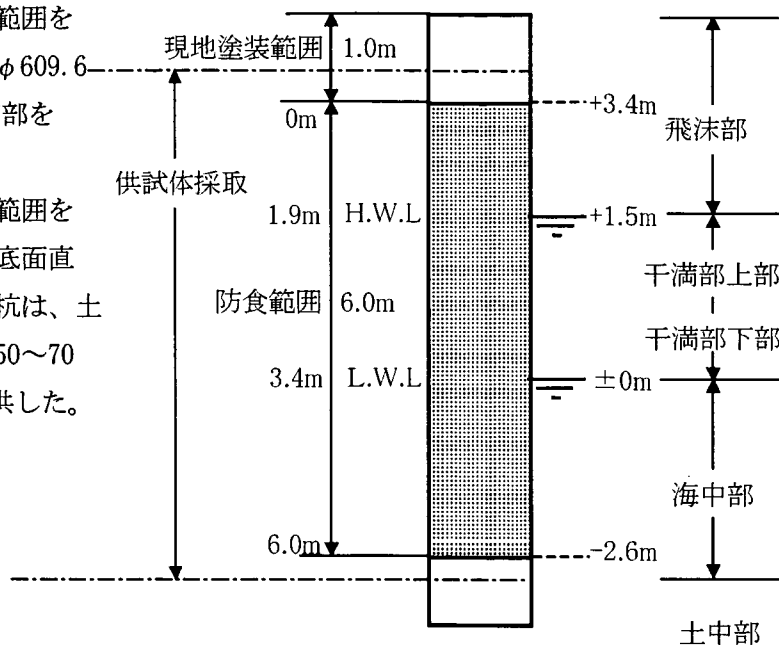


図 2.1-1 防食鋼管杭の形状・寸法・防食範囲

## (3) 調査対象杭の配置・配列

調査対象鋼管杭の鉛直と平面方向の設置・配列状況を図 2.1-1 および図 2.1-2 に示す。

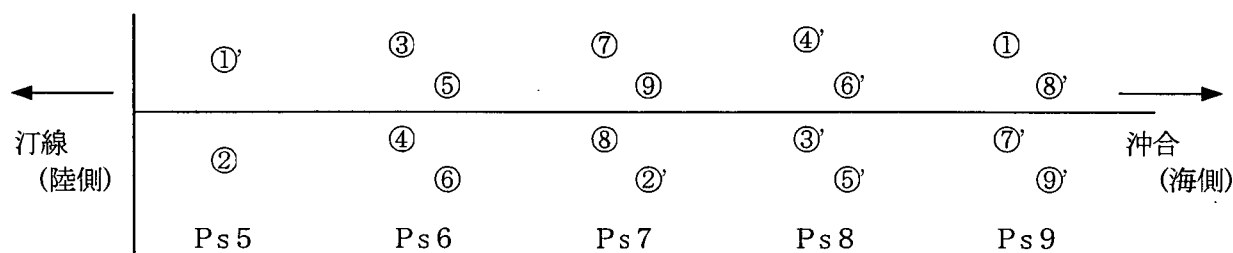


図 2.1-2 調査対象鋼管杭の配列

## (4) 調査項目

調査は回収した鋼管杭のまま現地で行う現地調査（土木研究所担当）と回収した鋼管杭を現地より各調査分担部署に運搬して行う詳細調査（鋼管杭協会担当）に分けた。1 次調査と鋼管より試験片を採取して行う 2 次調査に分けて実施した。1 次調査と 2 次調査のそれぞれの調査項目を表 2.1-4 に示す。表中の○は現地調査を示し、表中の①、②はそれぞれ詳細調査の 1 次、2 次調査を示す。

表2.1-4 防食被覆の種類と調査項目

| 杭No.   | 防 食 鋼 管 杭 の 種 類                                 | 調 査 項 目 |        |        |        |         |        |            |         |         |              |             |     |            |           |                 |           |        |        |             |
|--------|-------------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------|---------|---------|--------------|-------------|-----|------------|-----------|-----------------|-----------|--------|--------|-------------|
|        |                                                 | 外 観     |        | 素 地 面  |        | 電 気 抵 抗 | 付 着 力  | ビ ン ホ ール 厚 | 鉛 筆 硬 度 | 耐 衝 激 性 | イ ン ピ ー ダ ンス | 体 積 固 有 抵 抗 | p H | Cl 浸 透 深 さ | 中 性 化 深 さ | ス チ ー ル 金 網 腐 食 | 塩 分 含 有 量 | 肉 厚    | 貫 通 孔  | 鋼 境 界 部 腐 食 |
|        |                                                 | 目 視     | 写 真    | 目 視    | 写 真    |         |        |            |         |         |              |             |     |            |           |                 |           |        |        |             |
| Ps9-1  | 無防食                                             | ○<br>①  | ○<br>① | ○<br>① | ○<br>① |         |        |            |         |         |              |             |     |            |           |                 |           | ○<br>② | ②      | ②           |
| Ps5-1' | 耐海水鋼(Cr-Al系) (6mm)巻き                            | ○<br>①  | ○<br>① | ○<br>① | ○<br>① |         |        |            |         |         |              |             |     |            |           |                 |           | ○<br>② | ②      | ②           |
| Ps5-2  | 無機ジンクリッチペイント(75μm)<br>+タールエポキシ樹脂塗料 (300μm×3)    | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           |        |        | ②           |
| Ps7-2' | 同上                                              | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     |            |           |                 |           |        |        |             |
| Ps6-4  | 無機ジンクリッチペイント(75μm)<br>+エポキシ樹脂塗料(300μm×3)+ガラスクロス | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           |        |        |             |
| Ps8-4' | 同上                                              | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     |            |           |                 |           |        |        | ②           |
| Ps8-5' | エポキシ系レジンモンタルライニング (4mm)                         | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     |            |           |                 |           |        |        |             |
| Ps7-8  | ポリウレタンゴムライニング (7mm)                             | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           |        |        |             |
| Ps9-8' | 同上                                              | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           |        |        |             |
| Ps7-9  | ポリエチレン押出ライニング* (4mm)                            | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           |        |        |             |
| Ps9-9' | 同上                                              | ○<br>①  | ○<br>① |        |        | ①<br>②  | ①<br>② | ①<br>②     |         | ②<br>②  | ②<br>②       | ②<br>②      |     | ②<br>②     |           |                 |           | ○      |        |             |
| Ps7-7  | セメントモルタルライニング(47mm)<br>+ポリエステルFRPカバー (3mm)      | ○<br>①  | ○<br>① |        | ①<br>① |         |        |            |         |         |              |             |     | ②<br>②     | ②<br>②    | ②<br>②          | ②<br>②    | ②<br>② | ②<br>② | ①<br>②      |
| Ps9-7' | 同上                                              | ○<br>①  | ○<br>① |        | ①<br>① |         |        |            |         |         |              |             |     | ②<br>②     | ②<br>②    | ②<br>②          | ②<br>②    | ②<br>② | ②<br>② | ①<br>②      |

○；現地調査    ①；詳細1次調査    ②；詳細2次調査

## 2. 調査方法

### 2. 1 現地調査

現地調査として行う外観調査は、調査開始 → 杭頭部への番号と方位のマーキング、写真記録 → 付着生物の除去および清掃 → 引抜き杭の確認と生物付着状況観察、写真記録 → 被覆の劣化・腐食状況外観観察、写真記録 → 杭の鋼材の厚さ測定 → 杭の切断箇所のマーキング → 調査測定データ整理・報告書作成 という順序で実施した。

#### (1) 生物付着状況観察

各杭への海洋生物の付着状況は、所定の様式を用いて展開図を作成し、これにスケッチするとともに、写真記録をとる方法で調査した。調査は、全ての杭を対象として行なった。

#### (2) 防食被覆の劣化状況および鋼材の腐食状況観察

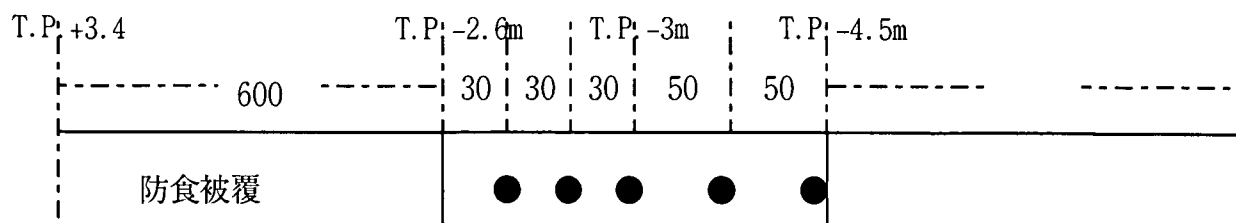
防食被覆の劣化状況および鋼材の腐食状況は、付着生物はく離・清掃後に、上記の展開図に除去前、除去後と分けてスケッチし、併せて写真記録をとる方法で調査した。調査は、全ての杭を対象とした。

#### (3) 杭の鋼材の厚さ測定

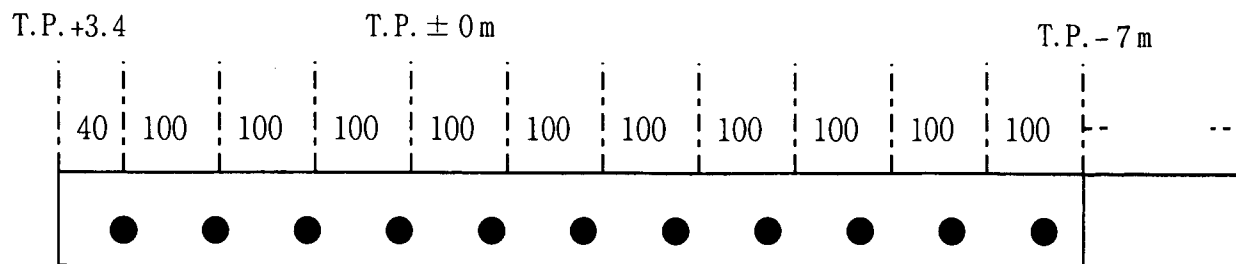
杭の鋼材の腐食やサンドエロージョンによる肉厚減少は、表 2. 2-1 に示した杭を対象に、図 2. 2-1 に示した位置について、表面の汚れや浮きさびを除去してから超音波厚さ計（UDM-750 型）を用いて厚さを測定し、初期値との差から計算により求めた。

表 2. 2-1 肉厚測定の対象

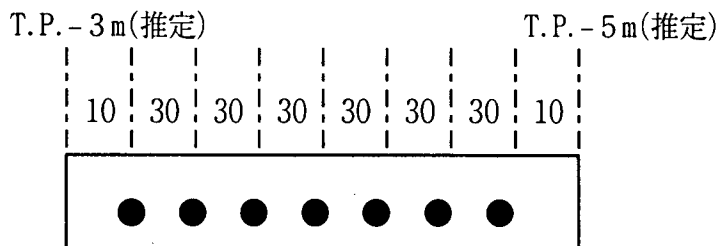
|      | 杭 No. | 防食被覆の種類        | 鋼管の径、初期肉厚        | 数量  |
|------|-------|----------------|------------------|-----|
| Ps 5 | ①     | 耐海水鋼(Cr-Al系)巻き | φ 609.6 t : 14mm | 1 本 |
| Ps 5 | ①     | タールエポキシ        | 〃 〃              | 〃   |
| Ps 9 | ⑨     | ポリエチレン         | 〃 〃              | 〃   |
| Ps 9 | ①     | 無防食（裸杭）        | 〃 〃              | 〃   |
| Ps 9 | —     | ガードリング(無防食)    | φ 914.4 t : 16mm | 2 本 |



(Ps 5)①'、②および(Ps 9)⑨' (防食被覆杭)



(Ps 9)① (無防食杭)



(Ps 9)に装置したガードリング

図2.2-1 厚さ測定位置 (単位: cm、●: 測定位置)

測定は1箇所の計測につき計測点を5点とり、その平均を求める方法で測定箇所それぞれ3回行い、計15回の平均値をもって各測定位置の値とし、併せて最大値も求めた。

#### (4) 撤去した防食鋼管杭の全長と切断位置

防食鋼管杭の撤去は、先ず、所定の位置(T.P. +3.4m)から杭の頭部を切断し、杭のナンバーリングおよび方位のマーキングを行なった後、海底土中の根入れ部を、海底面の2m以下を水中カッターで切断しバイブロハンマーを杭頭に装着して引き抜く方法で行った。引き抜いた防食鋼管杭は、海岸に設置した仮置場に運搬し枕木上に並べた杭は、それぞれ防食被覆を含む所定の長さに切断し詳細調査場所へ運搬した。

各防食鋼管杭の切断長さは8.95m~10.55mで詳細は第1編に述べてある。

#### (5) 防食被覆の厚さ測定

引き抜いた防食鋼管杭のうち、用意した電磁式厚さ計で被覆の厚さが測定できるものについては、現地で、杭のT.P. +2.8mから-2.2mまで1m間隔で、1測点各3回の厚さ測定を行った。

### 2. 2 詳細調査

#### (1) 無防食鋼管杭・耐海水鋼(Cr-Al系)巻き鋼管杭

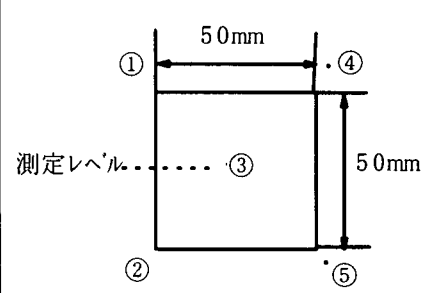
無防食・耐海水鋼(Cr-Al系)被覆鋼管杭の調査項目・内容・方法を表2.2-2、表2.2-3に示す。

耐海水鋼(Cr-Al系)被覆鋼管杭における被覆領域の下の鋼管露出部分については、被覆下70cmの範囲まで、10cm毎に肉厚測定を行った。貫通孔は海陸2方向の所定の幅について全長を調査した。

表2.2-2 無防食・耐海水鋼巻き鋼管杭の調査項目・内容

|   | 調査項目     | 区分 | 内 容                                                |
|---|----------|----|----------------------------------------------------|
| 1 | 外観       | 1次 | 付着生物除去後環境別に外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により腐食、塗膜損傷状況を耐久性を評価する  |
| 2 | 素地面      | 2次 | 各試験終了後環境別に被覆を剥離し、外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により素地面の腐食状況を調査する |
| 3 | 肉厚       | 〃  | 除錆酸洗後超音波厚さ計で海・陸側25cm間隔で全長5点平均で測定                   |
| 4 | 貫通孔・孔食深さ | 〃  | 海・陸側25cm間隔で目視で5点選びポイントマイクロメータで計測した最大値              |
| 5 | 腐食摩耗     | 〃  | 海底面近傍の漂砂による腐食摩耗の外観と上中下段0, 3, 6, 9時方向の肉厚測定          |

表 2.2-3 板厚測定方法

| 杭No             | 除錆処理                       | 項目         | 測定器             | 方向                | 測定位置                            |                                                                                     |
|-----------------|----------------------------|------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Ps9-1<br>Ps5-1' | 10%ケン酸<br>第2アンモニウム<br>塩水溶液 | 肉厚<br>(板厚) | 超音波厚み計          | 2方向<br>・海側<br>・陸側 | 肉厚<br>上から<br>25cm毎<br>右5点<br>平均 |  |
|                 |                            | 貫通孔<br>孔食  | ポイントマイ<br>クロメータ |                   | 貫通孔<br>・孔食<br>右最大値              | 貫通孔・孔食は鋼管全長を縦25x横20cmに区切り、その範囲毎に肉眼で確認し、大きさ・深さを測定した。                                 |

(2) 塗覆装鋼管杭・有機ライニング鋼管杭

塗覆装鋼管杭・有機ライニング鋼管杭の調査項目・内容を表 2.2-4(表中の○印は調査実施項目を示す)に示し、定位置の調査測定位置を図 2.2-2 に、各測定法を図 2.2-3、図 2.2-4 に示す。

(i) 外観調査

|       |             |
|-------|-------------|
| 飛沫部   | +1.5～+3.4m  |
| 干満部上部 | +0.75～+1.5m |
| 干満部下部 | 0.0～+0.75m  |
| 海中部   | 0.0～-2.6m   |
| 土中部   | -2.6m～      |

(ii) 1次ピンホール試験

防食全範囲

(付着力、電気抵抗)採取・測定

|       |            |
|-------|------------|
| 飛沫部   | +1.5～+3.4m |
| 干満部下部 | 0.0～+0.75m |
| 海中部   | 0.0～-2.6m  |
| 土中部   | -2.6m～     |

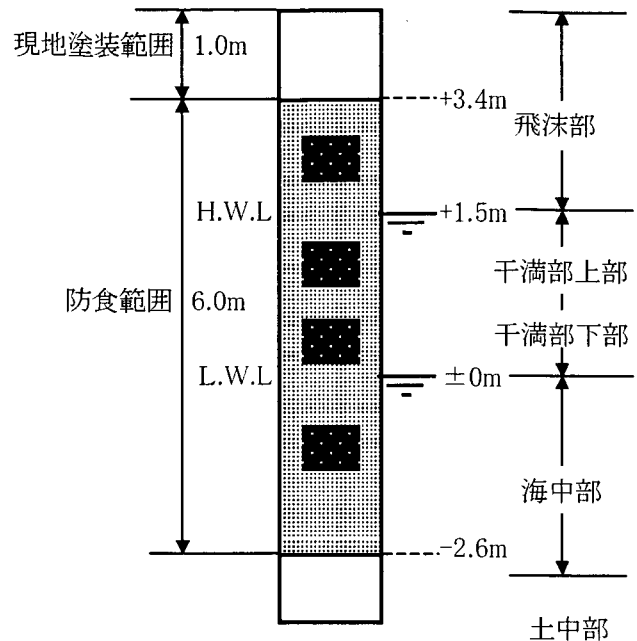
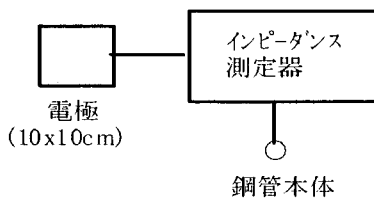
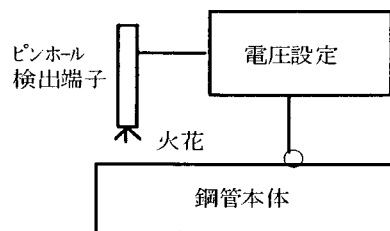


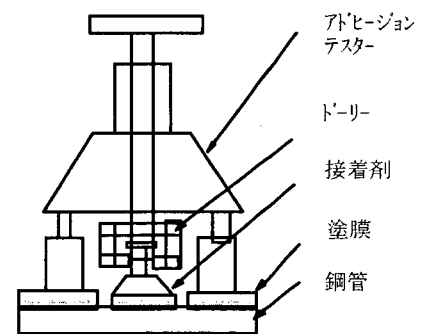
図 2.2-2 塗覆装鋼管杭の定位置調査測定位置 (■)



電気抵抗及び  
インピーダンス測定



ピンホール測定



プルオフ式付着力測定

図 2.2-3 測定方法(1)

表2.2-4 塗覆装鋼管杭・有機ライニング鋼管杭の調査項目・内容

| 塗覆 | 有機 | No. | 調査項目       | 内 容                                                                                                                                                                                        |
|----|----|-----|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ○  | ○  | 1   | 外観         | 付着生物除去後環境別に外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により腐食、塗膜損傷状況を耐久性を評価する。                                                                                                                                         |
| ○  | ○  | 2   | 素地面        | 各試験終了後環境別に被覆を剥離し外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により素地面の腐食状況を調査する。                                                                                                                                         |
| ○  | ○  | 3   | 電気抵抗       | 付着力測定と同様な部位で、電解ペースト（CMC+3% NaCl）で貼り付けたアルミ箔（10×10cm）を対極としインピーダンス測定器を用いて1kHzで測定する。                                                                                                           |
| ○  |    | 4   | 付着力（プルオフ式） | 海、陸側、飛沫、干満上・下、水中部で1ヶ所、3点をサンドペーパー#240で研磨、ドーリーを速硬化性エポキシ樹脂で接着、電動回転式カッターで周囲を研削後アドヒージョンテスターで測定する。                                                                                               |
|    | ○  | 5   | 付着力（ピール式）  | ポリウレタンゴムやポリエチレン被覆鋼管のピール強度（JIS G3469(1986)）に従い被覆に間隔10mm、長さ60mm以上の2本の切れ目を原管に達するまで入れ、その一端を剥ぎ起こし、荷重を測定する。<br>剥ぎ起こし角度：約90° または180° 方向<br>剥ぎ起こし速度：約50mm/min                                      |
| ○  | ○  | 6   | ピンホール      | 水洗乾燥後塗膜健全部の全面をピンホールテスター（測定電圧5,10kV）を用いて測定する。                                                                                                                                               |
| ○  | ○  | 7   | 膜厚         | 付着力測定と同様な部位でケット電磁膜厚計を用いて1部位で5点測定し平均値を求める。                                                                                                                                                  |
| ○  |    | 8   | 鉛筆硬度       | 付着力測定と同様な部位でJIS K-5400「鉛筆引っかき試験」により測定する。                                                                                                                                                   |
| ○  | ○  | 9   | 耐衝撃性       | 付着力測定と同様な部位で「水道鋼管コールドタルエナメルと塗覆装JIS G-3492 6.3.3(4) 衝撃試験」により高さ2.4mから鋼球650gを落して測定する。                                                                                                         |
| ○  | ○  | 10  | インピーダンス    | 付着力測定と同様な部位で、電解ペースト（CMC+3%NaCl）で貼り付けたアルミ箔（10×10cm）を対極としインピーダンス測定器を用いて測定する。                                                                                                                 |
| ○  | ○  | 11  | 体積固有抵抗     | 付着力測定と同様な部位でインピーダンスと同様な対極を用いて直流安定化電源から定電圧で通電し直流微小電流計で電流を測定し抵抗を算出し $\Omega \cdot \text{cm}$ で表示する。                                                                                          |
| ○  |    | 12  | C1浸透深さ     | タガネなどによる露出被覆層や切り出し試験片の断面に1%フェノールフタレイン溶液を振りかけ非発色部の長さを測定する。                                                                                                                                  |
| ○  |    | 13  | 鋼境界部腐食摩耗   | 海底切断端部の無防食部の外観観察・写真撮影と上、中、下段、0, 3, 6, 9時方向の肉厚を測定する。                                                                                                                                        |
|    | ○  | 14  | ショアD硬度     | 測定はJIS K 7215に準拠し、ショア硬度計Dタイプを用いて測定する。                                                                                                                                                      |
|    | ○  | 15  | 被膜強度       | ポリウレタンゴムライニング材の引張試験はJIS K-6301 加硫ゴム物理試験方法に準拠し、3号試験片、試験速度500mm/minで行い、破断強度、伸び率を求める。<br>ポリエチレン押し出しライニング材の引張試験はJIS K-6760 ポリエチレン試験方法に準拠し、JIS K-7113 2号試験片、試験速度50mm/minで行い、破断強度、降伏点強度、伸び率を求める。 |
|    | ○  | 16  | 被膜M. I.    | 測定はJIS K-7210 熱可塑性プラスチックの流れ試験方法 A法（手動切り取り法）に準拠し、試験温度190℃、試験荷重2.16kgfで行う。                                                                                                                   |
|    | ○  | 17  | 被膜密度       | 測定はJIS K-7112 プラスチックの密度と比重の測定方法 A法（水中置換法）に準拠する。                                                                                                                                            |

試験方法：被覆に間隔 10mm、長さ 60mm 以上の 2 本の切れ目を原管に達するまで  
 入れ、その一端を剥ぎ起こし、荷重を測定する。  
 剥ぎ起こし角度；約 90° または約 180° 方向  
 速度 ；約 50mm/min  
 JIS G 3469(1986)

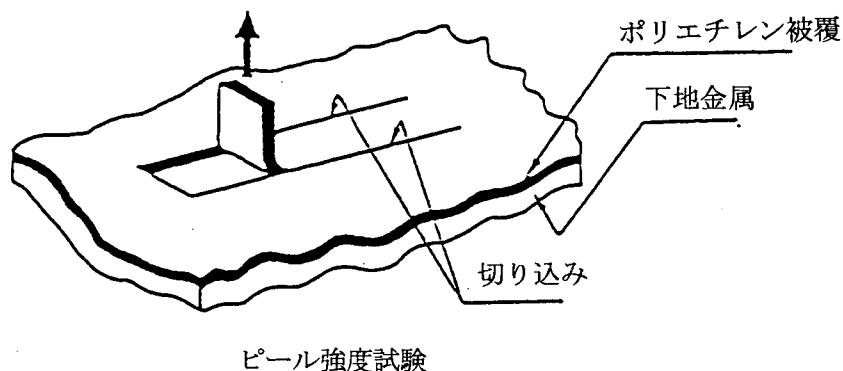


図 2.2-4 測定方法(2)

### (3) セメントモルタルライニング鋼管杭

セメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭の調査項目と内容を表 2.2-5 に示す

表 2.2-5 セメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭の調査項目と内容

| No | 調査項目     | 区分 | 内 容                                                                        |
|----|----------|----|----------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 外観       | 1次 | 付着生物除去後環境別に外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により腐食、塗膜損傷状況(さび、ふくれ、われ、はがれなど)等の耐久性を評価(A~E)する。  |
| 2  | 金網・鉄筋腐食  | "  | 海、陸側の飛沫、干満上・下、水中部の4部位からタガネで金網面露出させ、目視観察、スケッチ、写真撮影により金網の素地面の腐食状況を調査する。      |
| 3  | 素地面      | 2次 | 各試験終了後環境別に被覆を剥離し外観を目視観察、スケッチ、写真撮影により素地面の腐食状況を調査する。                         |
| 4  | pH       | "  | 海、陸側の飛沫、干満上・下、水中部の4部位から試料を粉砕して粉末状にし重量比の10倍の蒸留水を加え、6時間振とう機にかけて上澄み液をpHメータで測定 |
| 5  | 中性化深さ    | "  | タガネなどによる露出被覆層や切り出し試験片の断面に1%フェノールフタレイン溶液を振りかけ非発色部の長さを測定する(写真2-1参照)。         |
| 6  | 塩分含有量    | "  | pH測定と同じ試料溶液を用い、化学分析により定量した。                                                |
| 7  | 鋼境界部腐食磨耗 | "  | 海底切断端部の無防食部の外観と上、中、下段、0,3,6,9時方向の肉厚測定                                      |

### 3. 現地調査結果

#### 3. 1 生物付着状況の外観目視観察

杭頭部の切断→杭番号のナンバーリングおよび方位のマーキング→引抜きを終えた防食鋼管杭を、海岸に設けた仮置きエリアの枕木上に並べ、陸側、海側の方位別に鋼管杭を転がしながら、生物の付着状況を目視による外観観察と展開図へのスケッチおよび写真撮影を行った。生物付着状況および後述する生物除去後の状況を図 2.3-1(1)～(18)に示す。

観察結果から、生物の付着量は、陸側と海側で多少の差異が認められ陸側の方が多い場合もかなりあるが、曝露試験の初期に見られたような明瞭な差異は無くなっているように思われる。波浪が直接当たる海側は、生物の付着が幾分少ないように見受けられるが、その差異が以前よりはっきりしなくなっているのは、防食被覆の表面状態が、漂砂による磨耗や生物からの分泌物の付着等により、次第に平滑さを失い、生物が付着しやすい状態になっているためではないかと推察される。

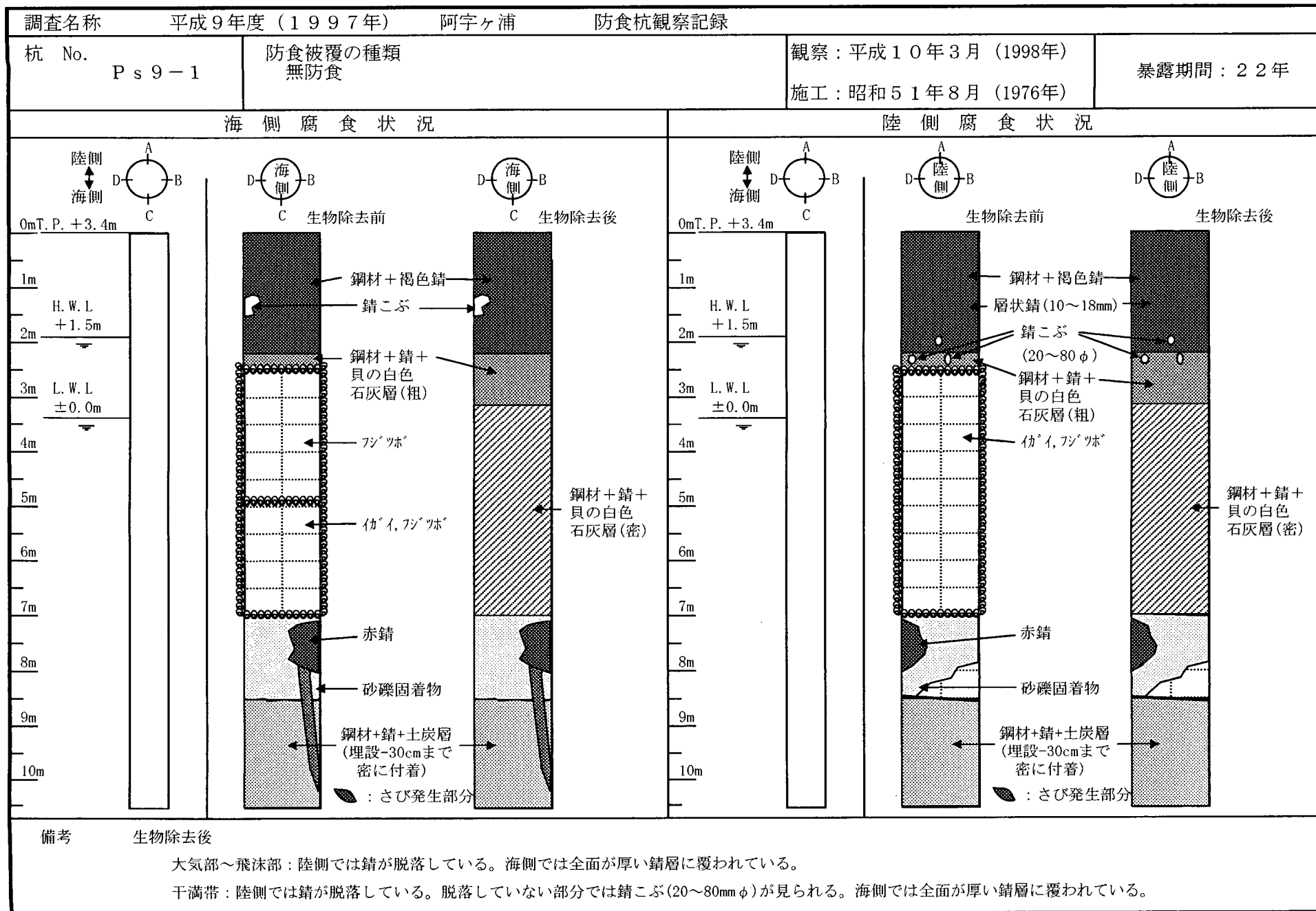


図 2.3-1 (1) 生物付着状況および被覆劣化状況

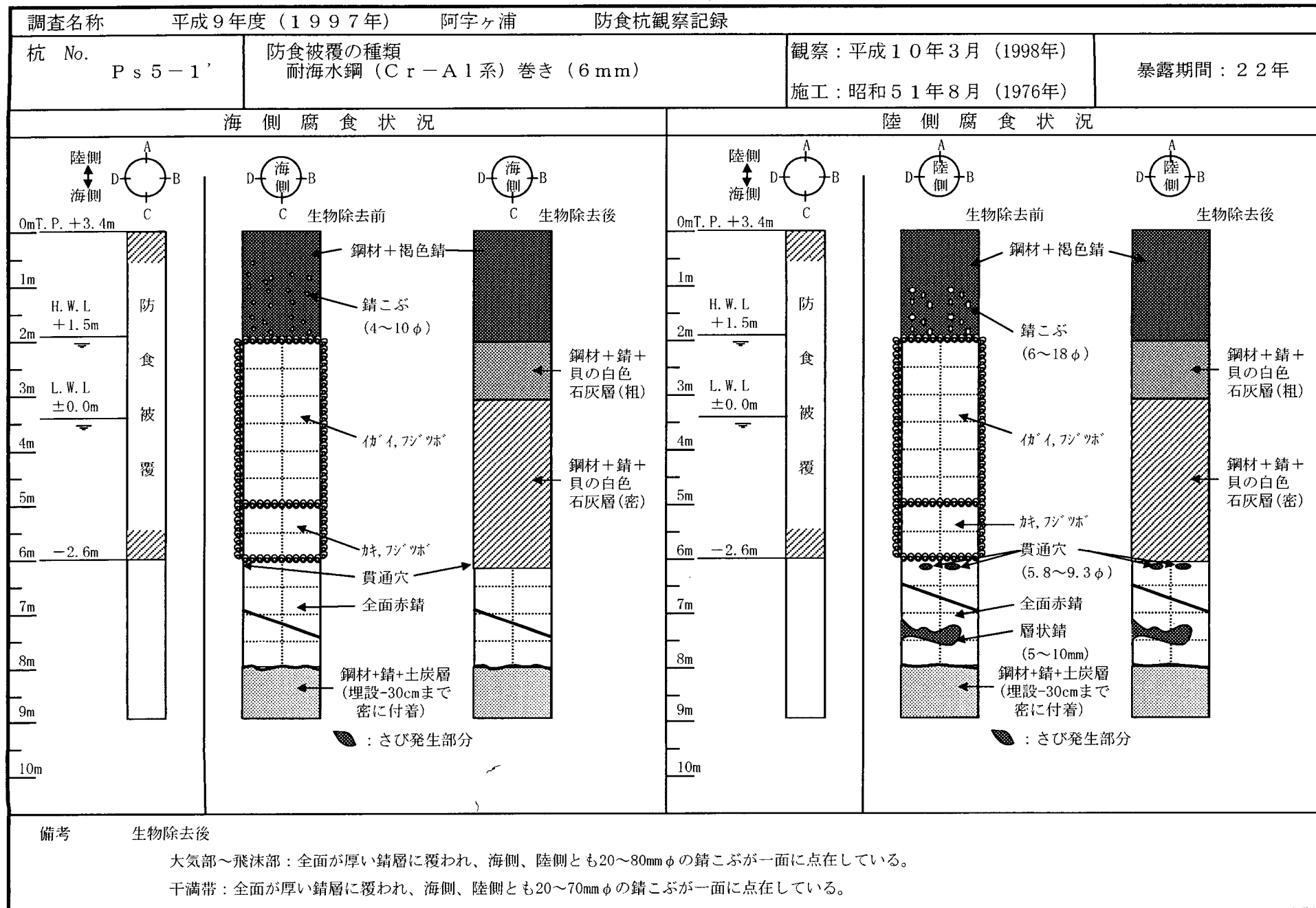


図 2.3-1 (2) 生物付着状況および被覆劣化状況

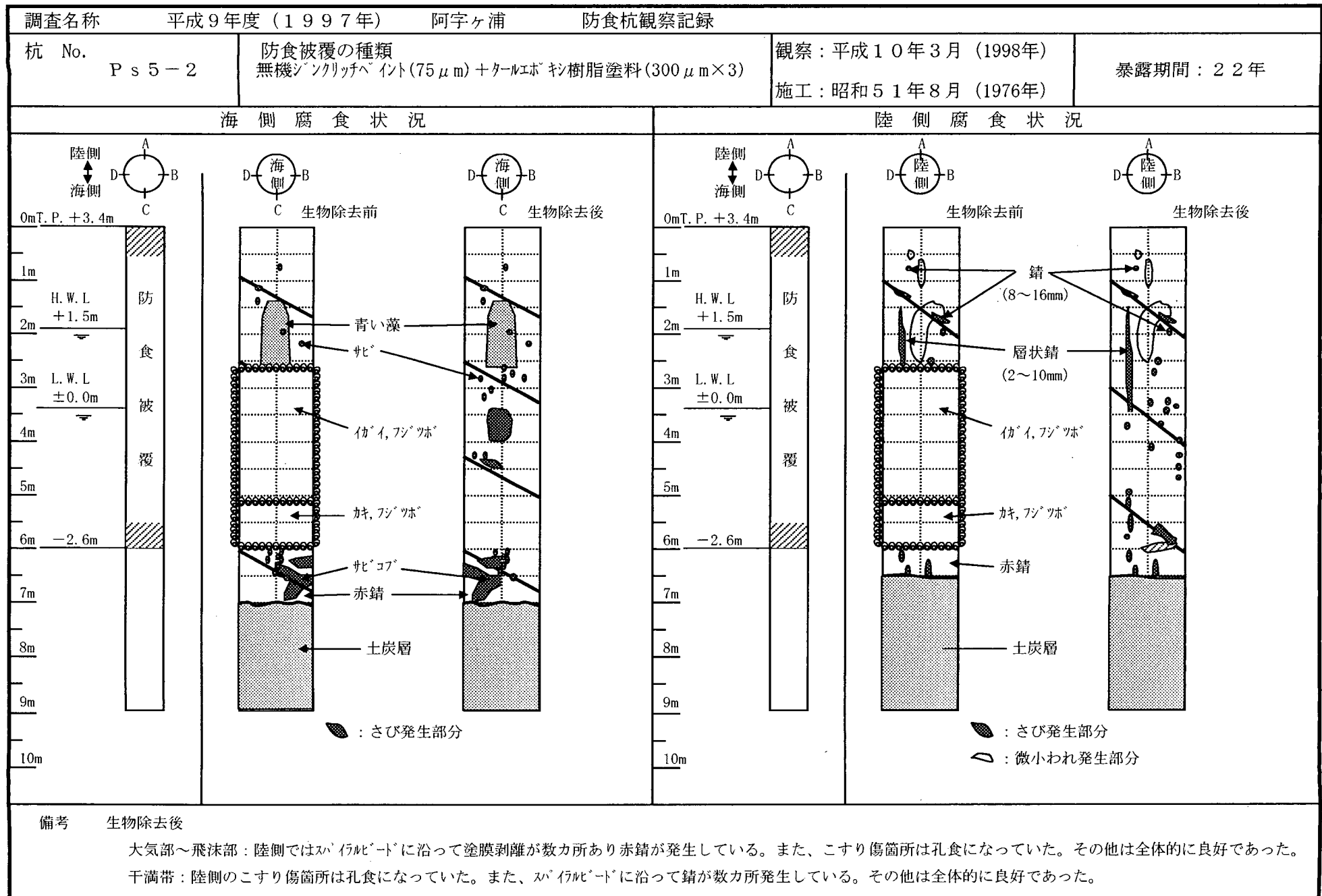


図 2.3-1 (3) 生物付着状況および被覆劣化状況

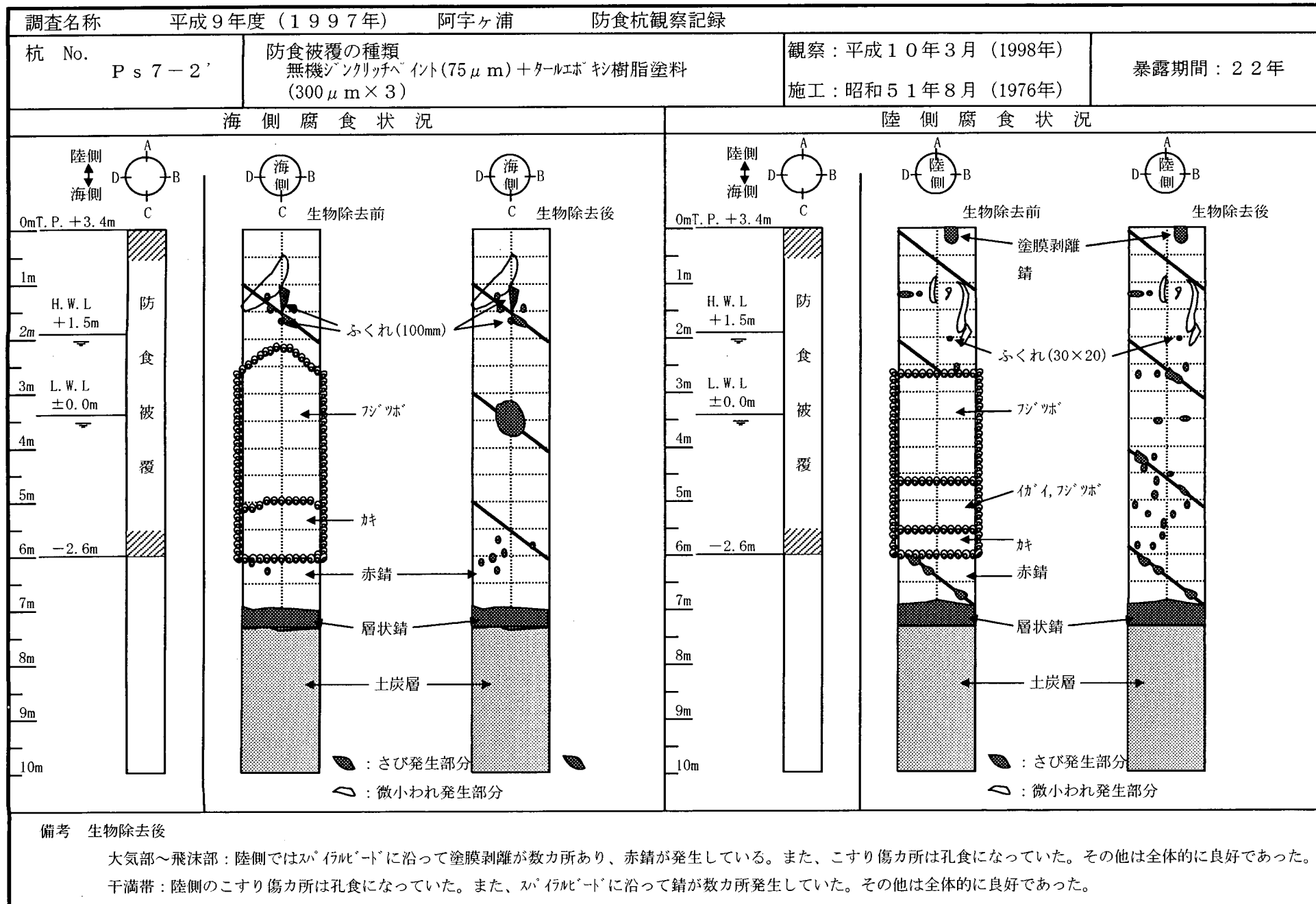


図 2.3-1 (4) 生物付着状況および被覆劣化状況

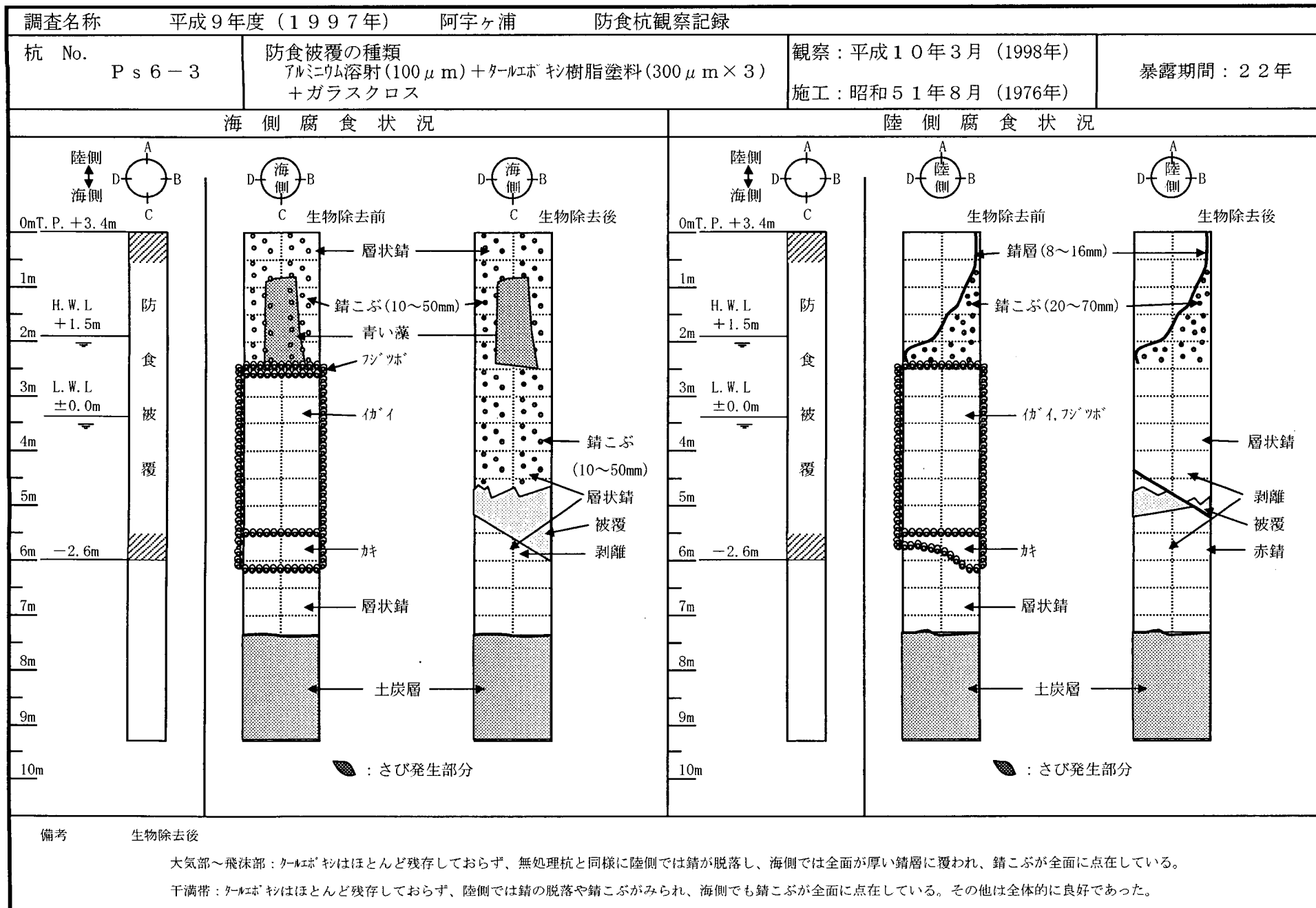


図 2.3-1 (5) 生物付着状況および被覆劣化状況

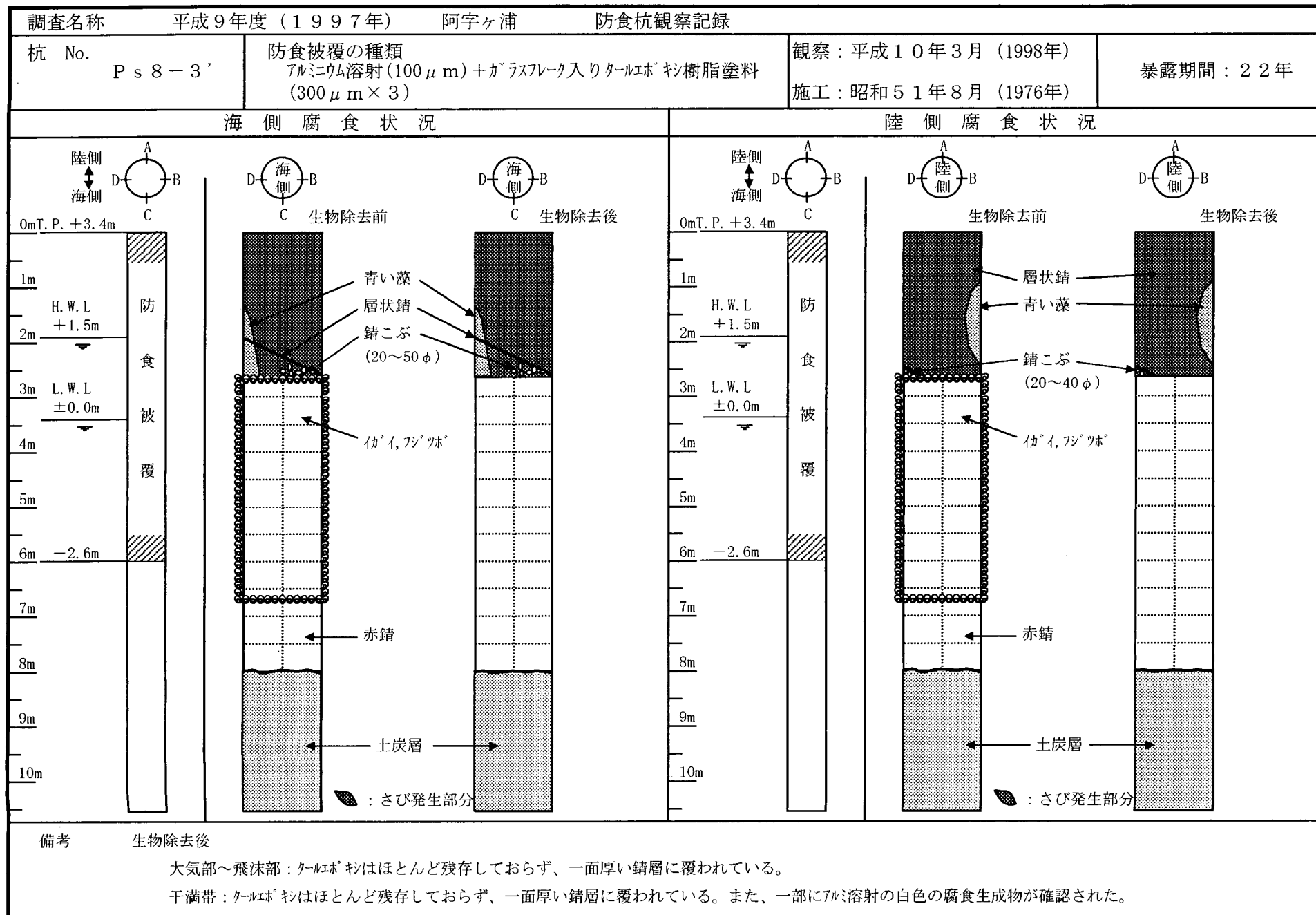


図 2.3-1 (6) 生物付着状況および被覆劣化状況

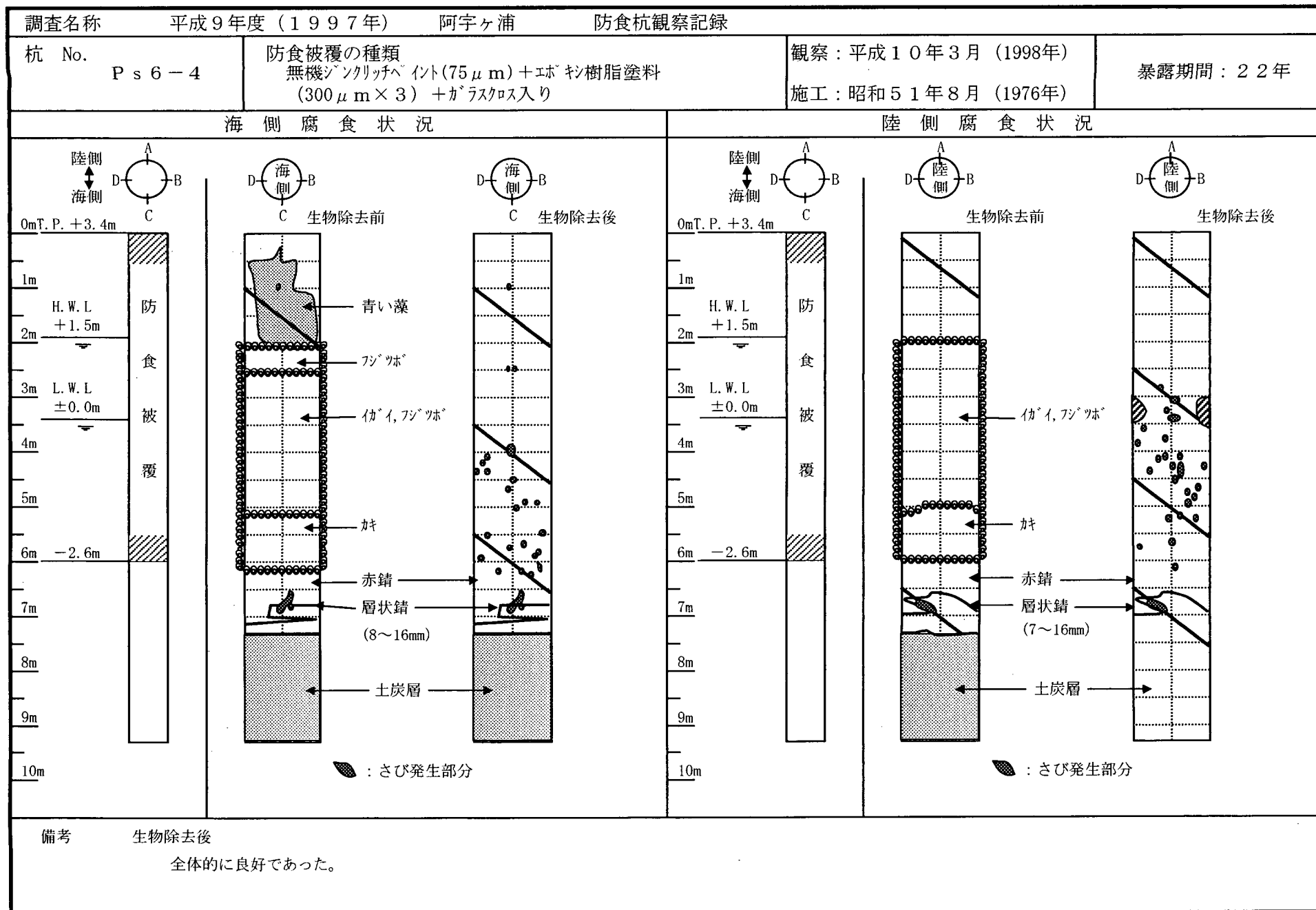


図 2.3-1 (7) 生物付着状況および被覆劣化状況

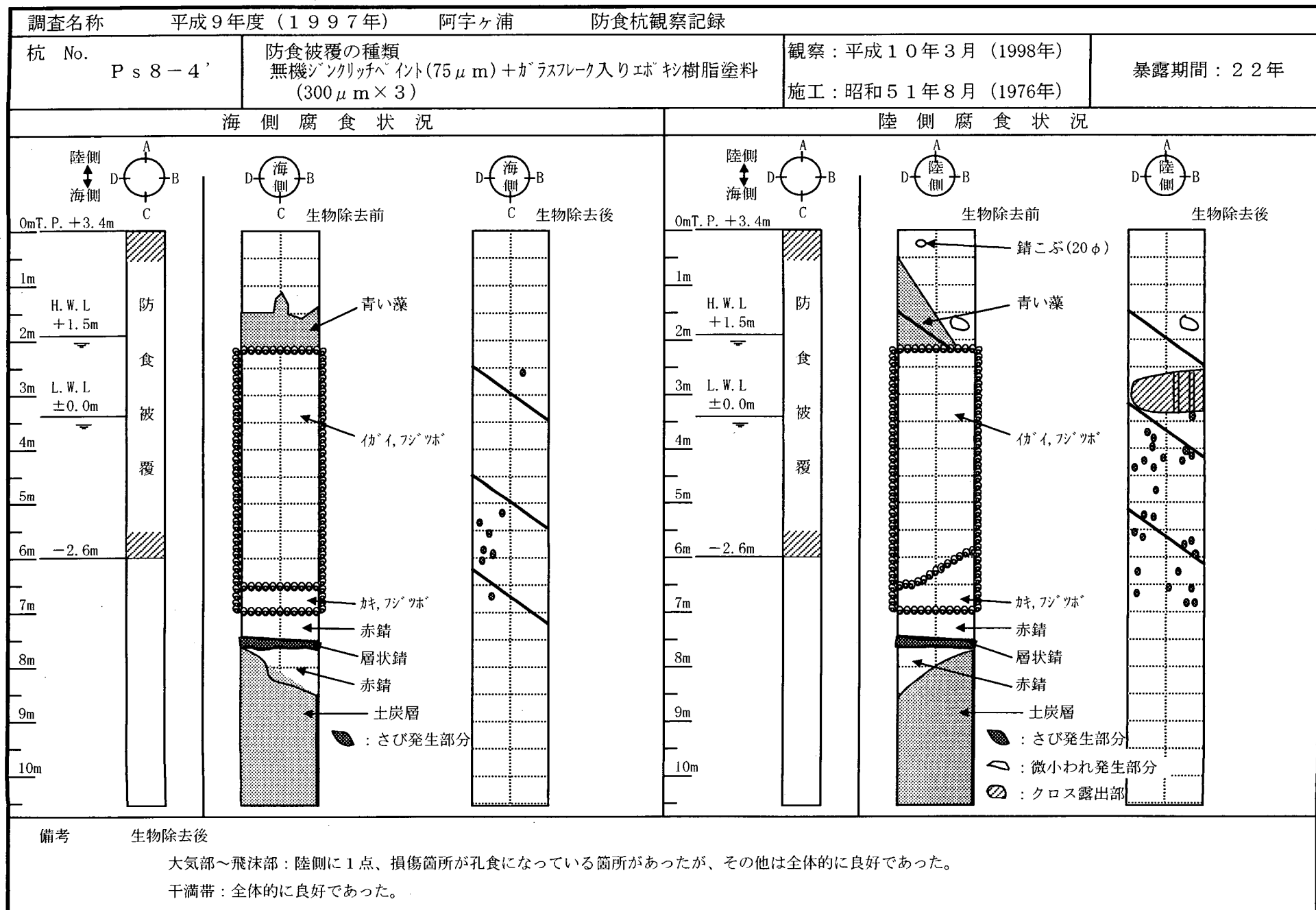


図 2.3-1(8) 生物付着状況および被覆劣化状況

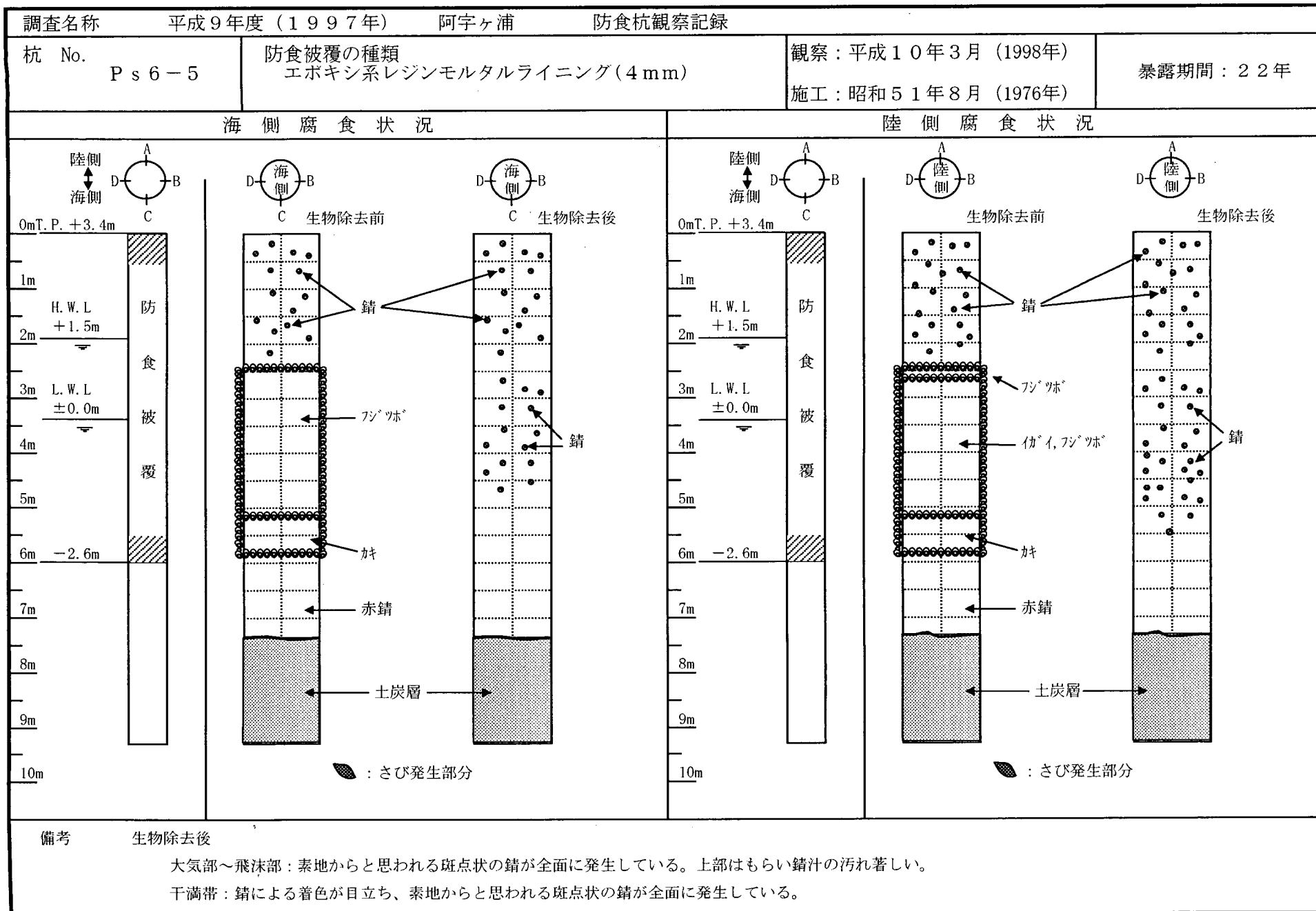


図 2.3-1 (9) 生物付着状況および被覆劣化状況

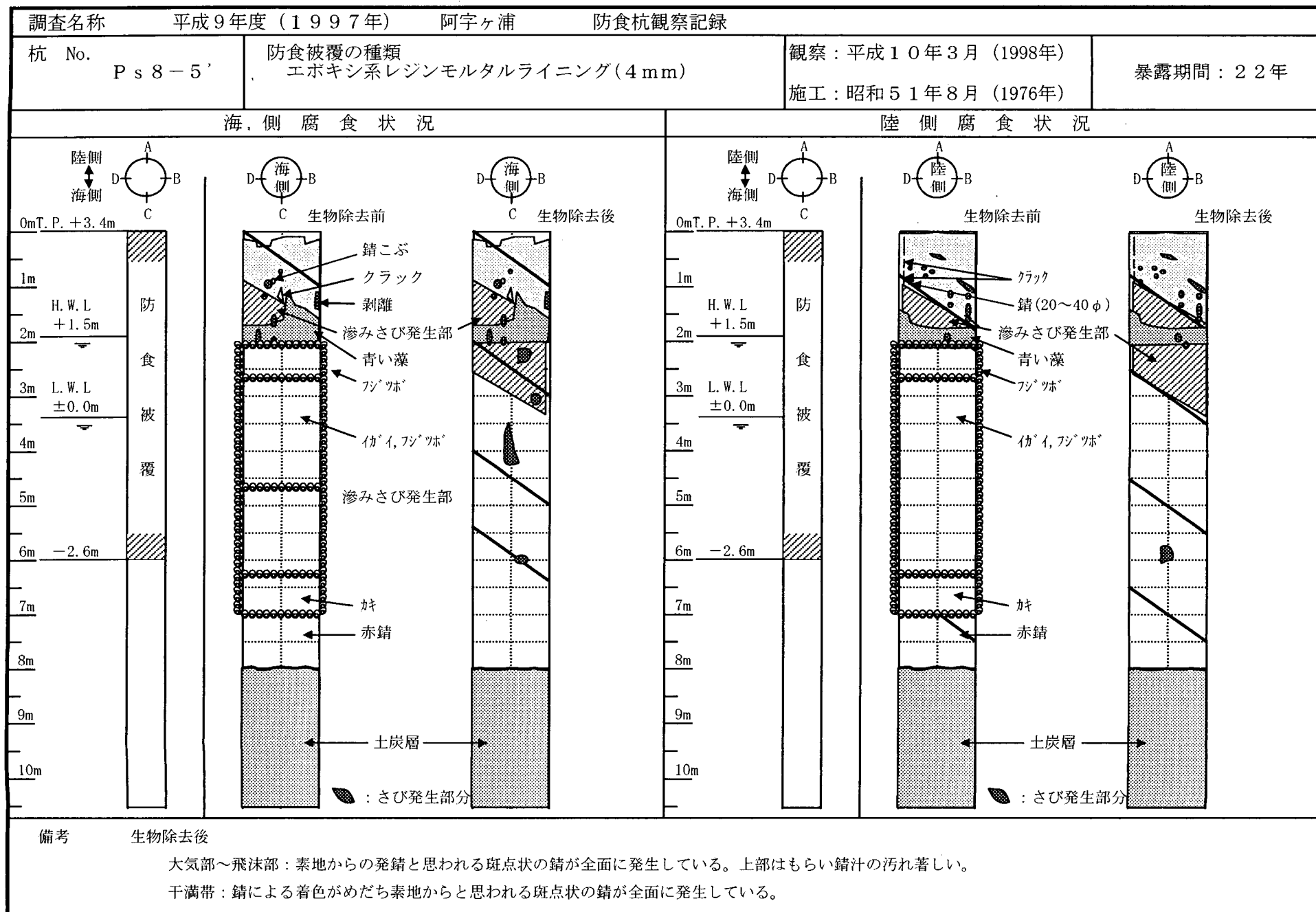


図 2.3-1 (10) 生物付着状況および被覆劣化状況

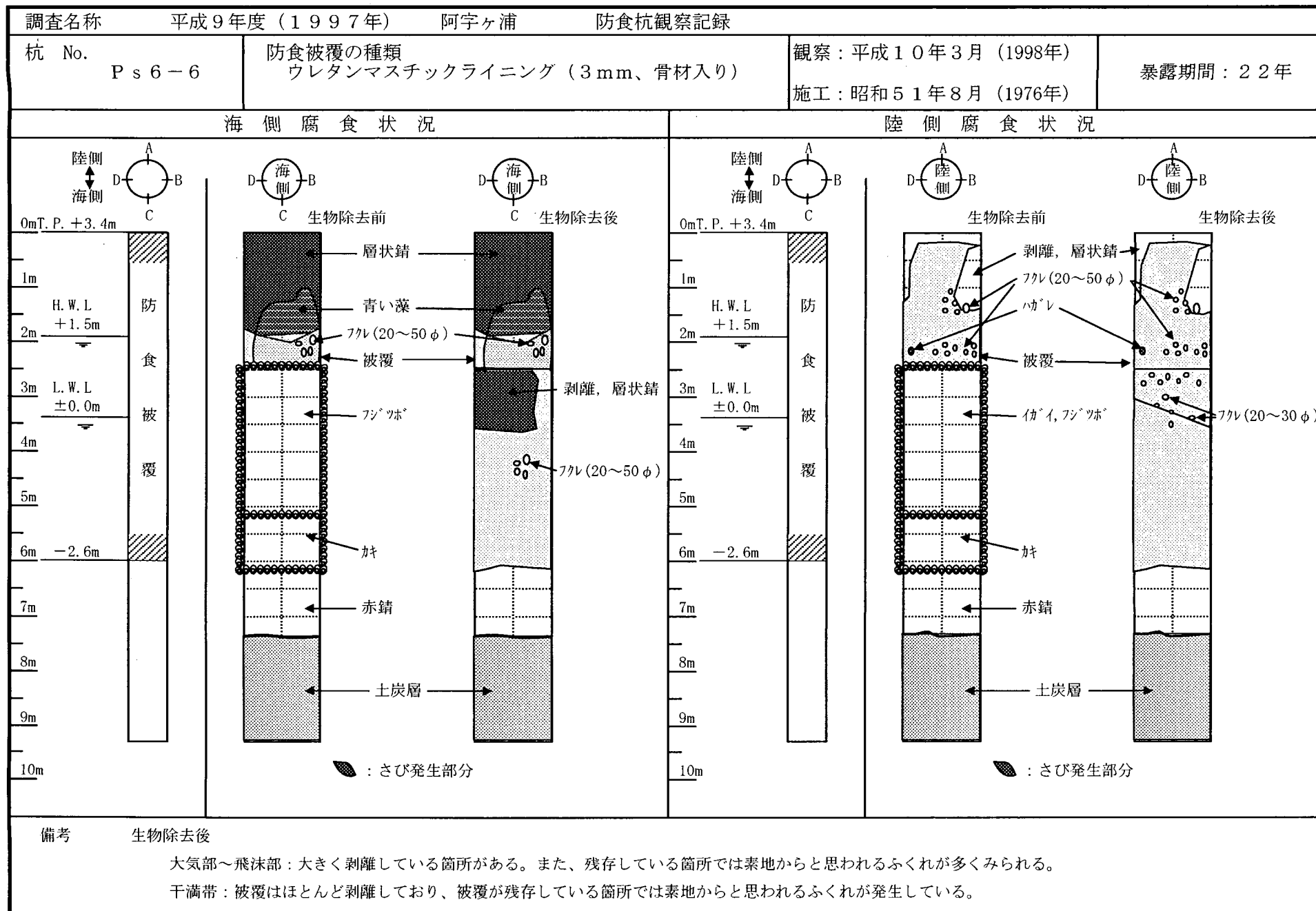


図 2.3-1 (11) 生物付着状況および被覆劣化状況

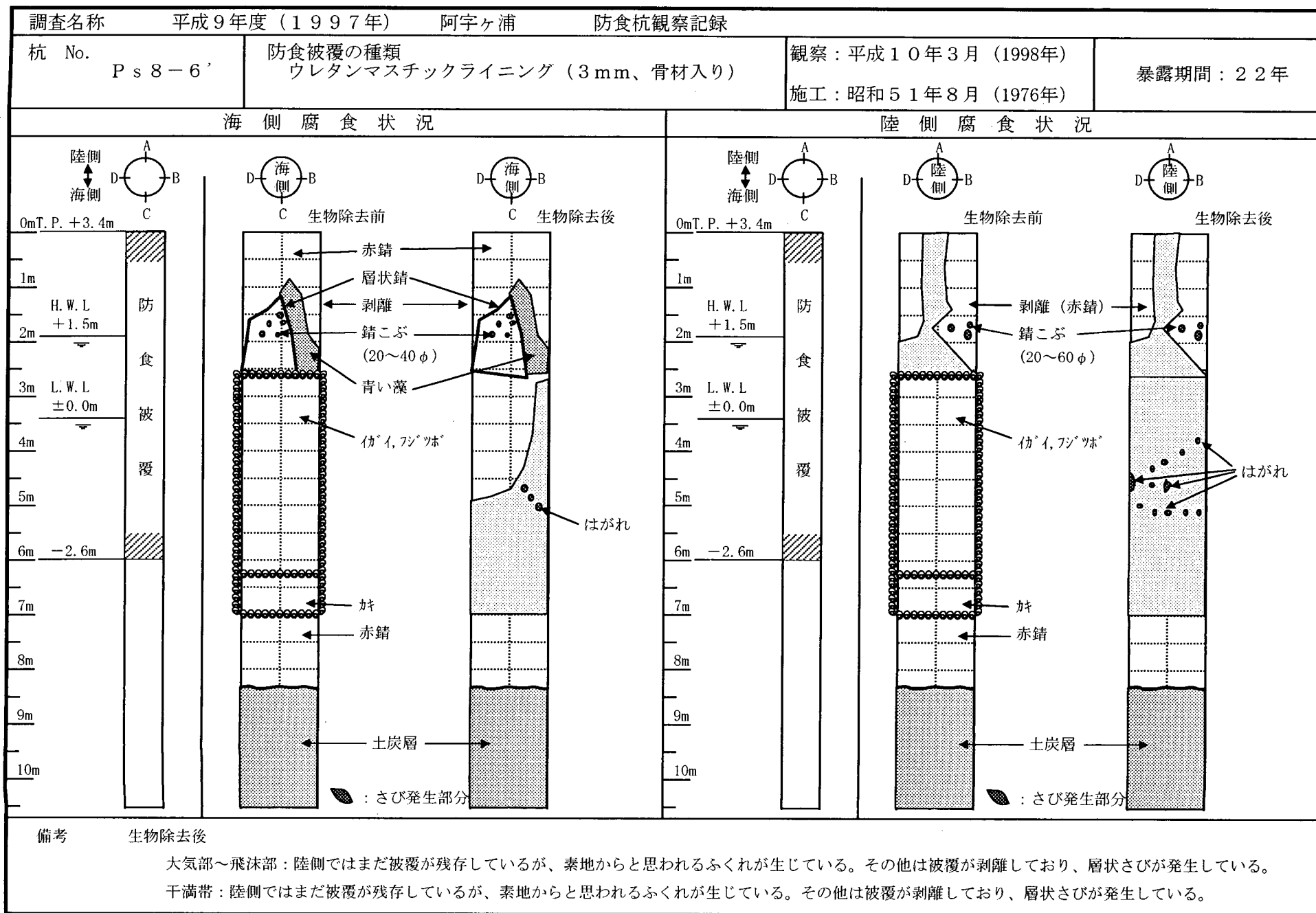


図 2.3-1 (12) 生物付着状況および被覆劣化状況

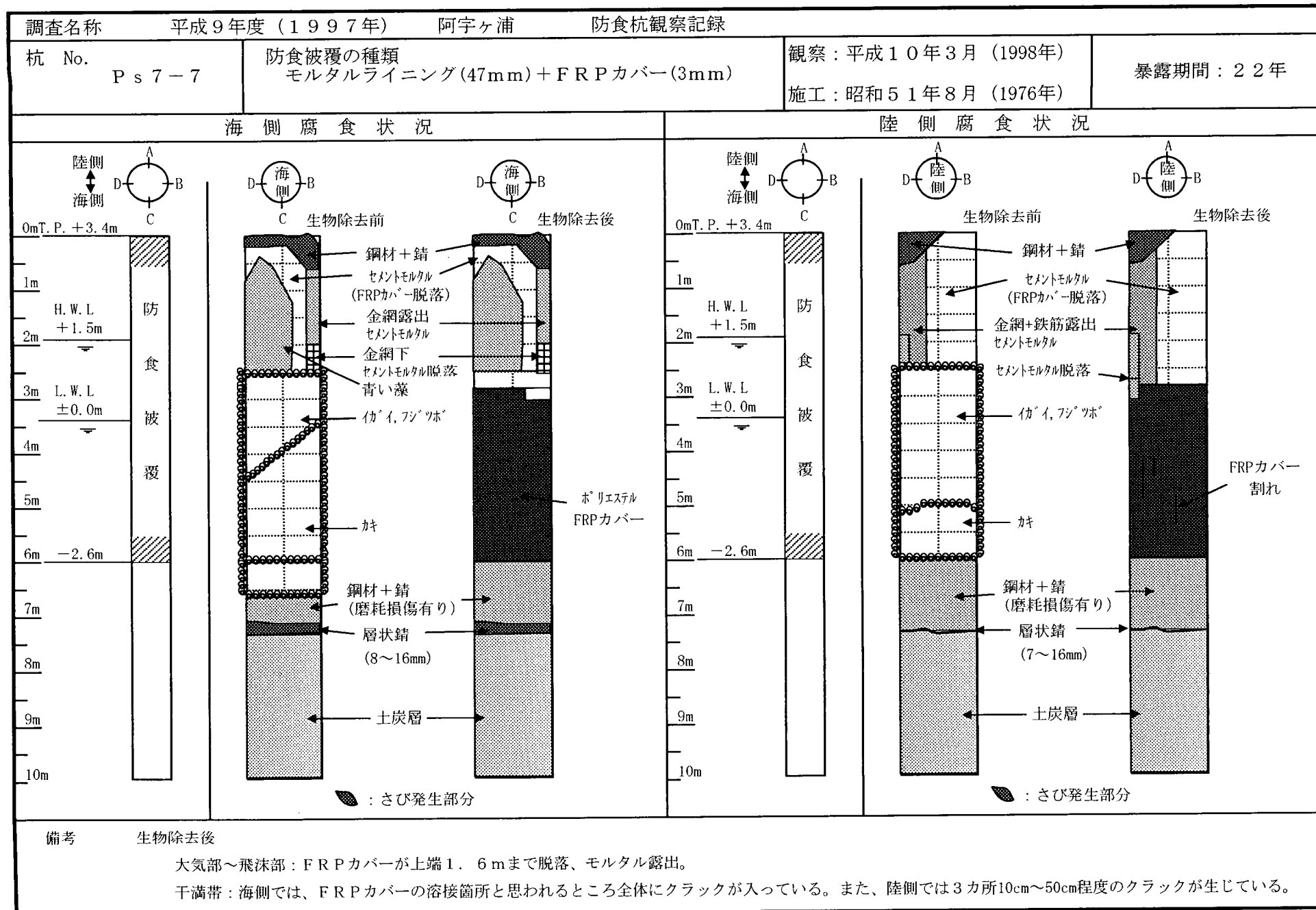


図 2.3-1 (13) 生物付着状況および被覆劣化状況

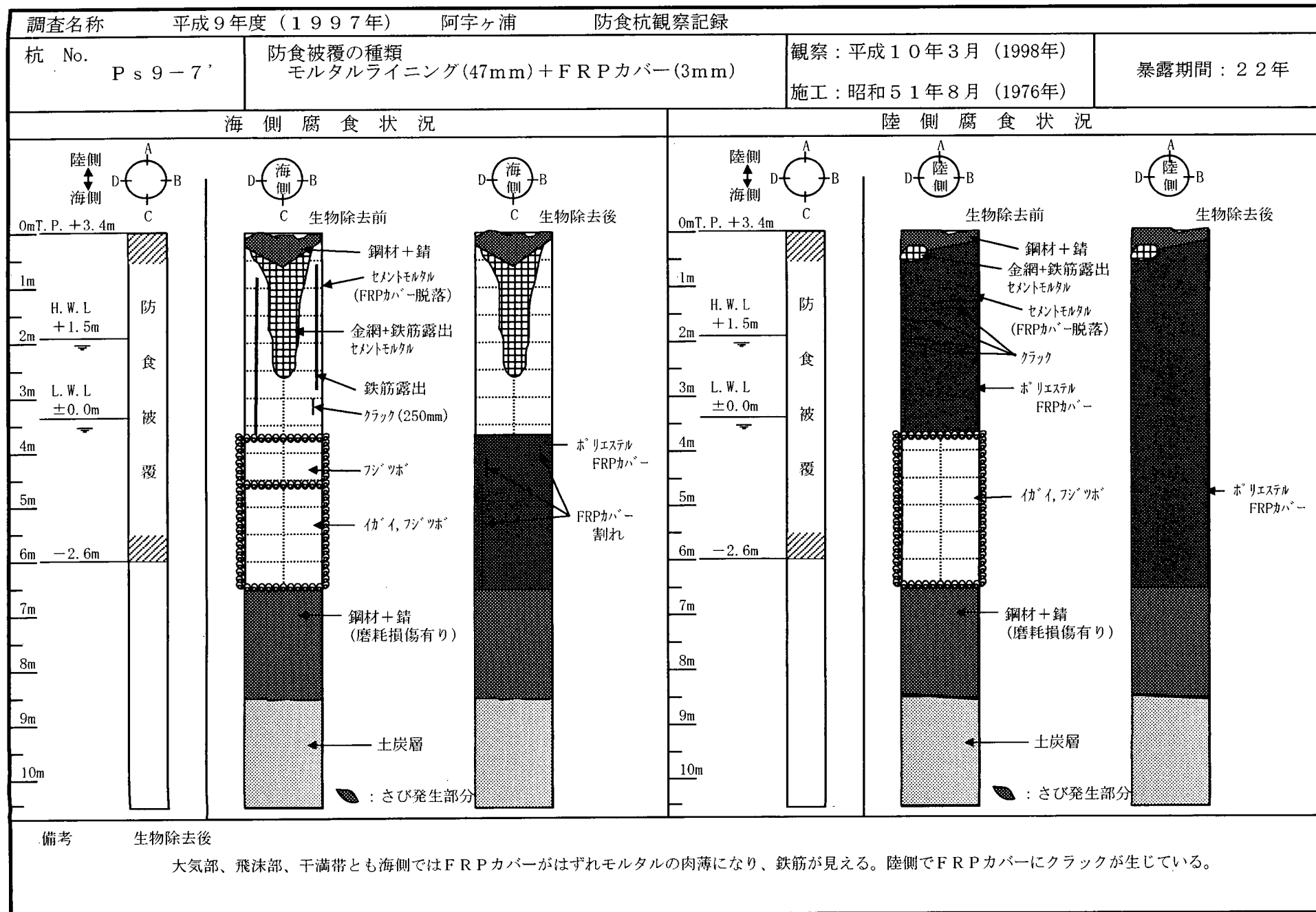


図 2.3-1 (14) 生物付着状況および被覆劣化状況

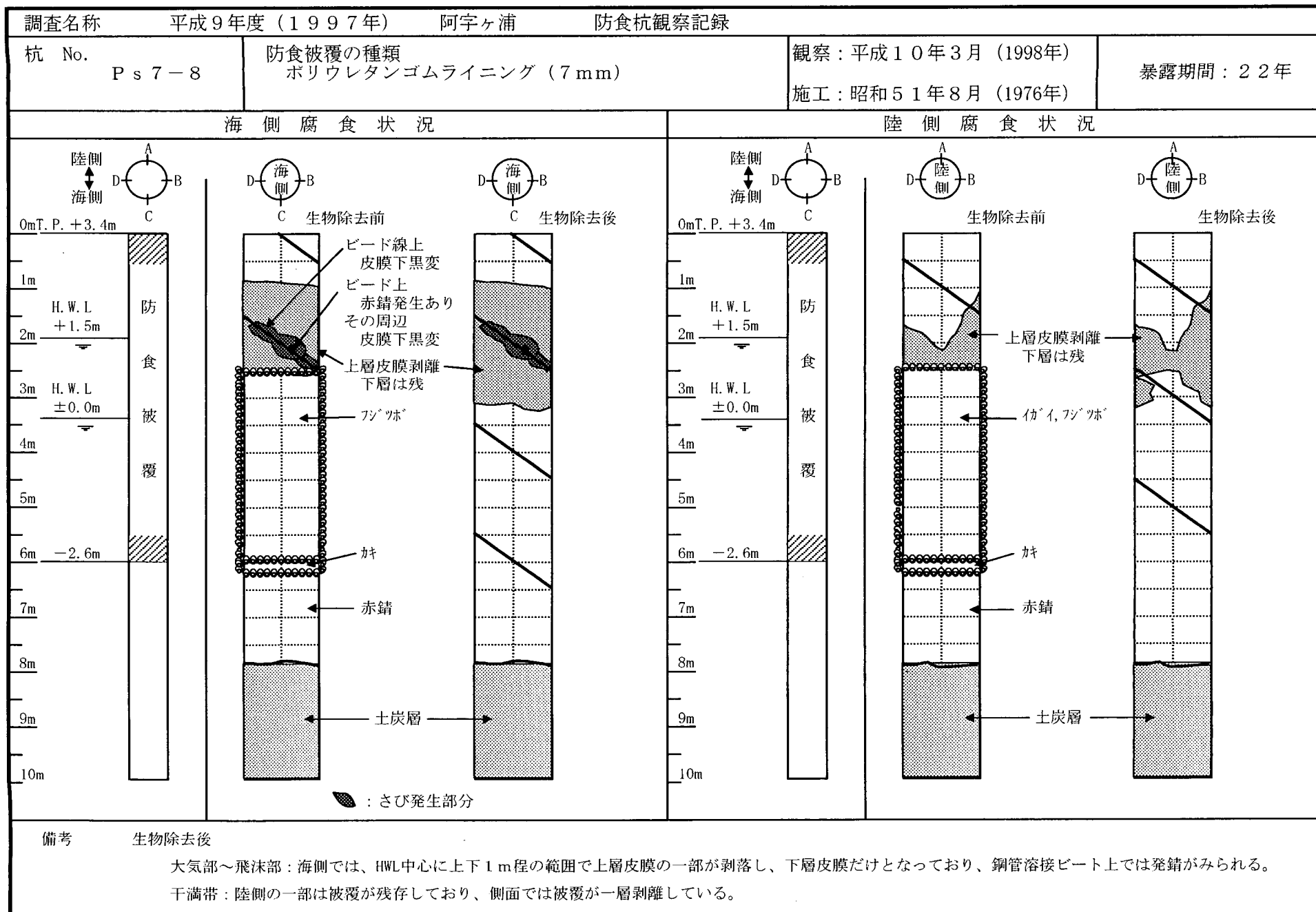


図 2.3-1 (15) 生物付着状況および被覆劣化状況

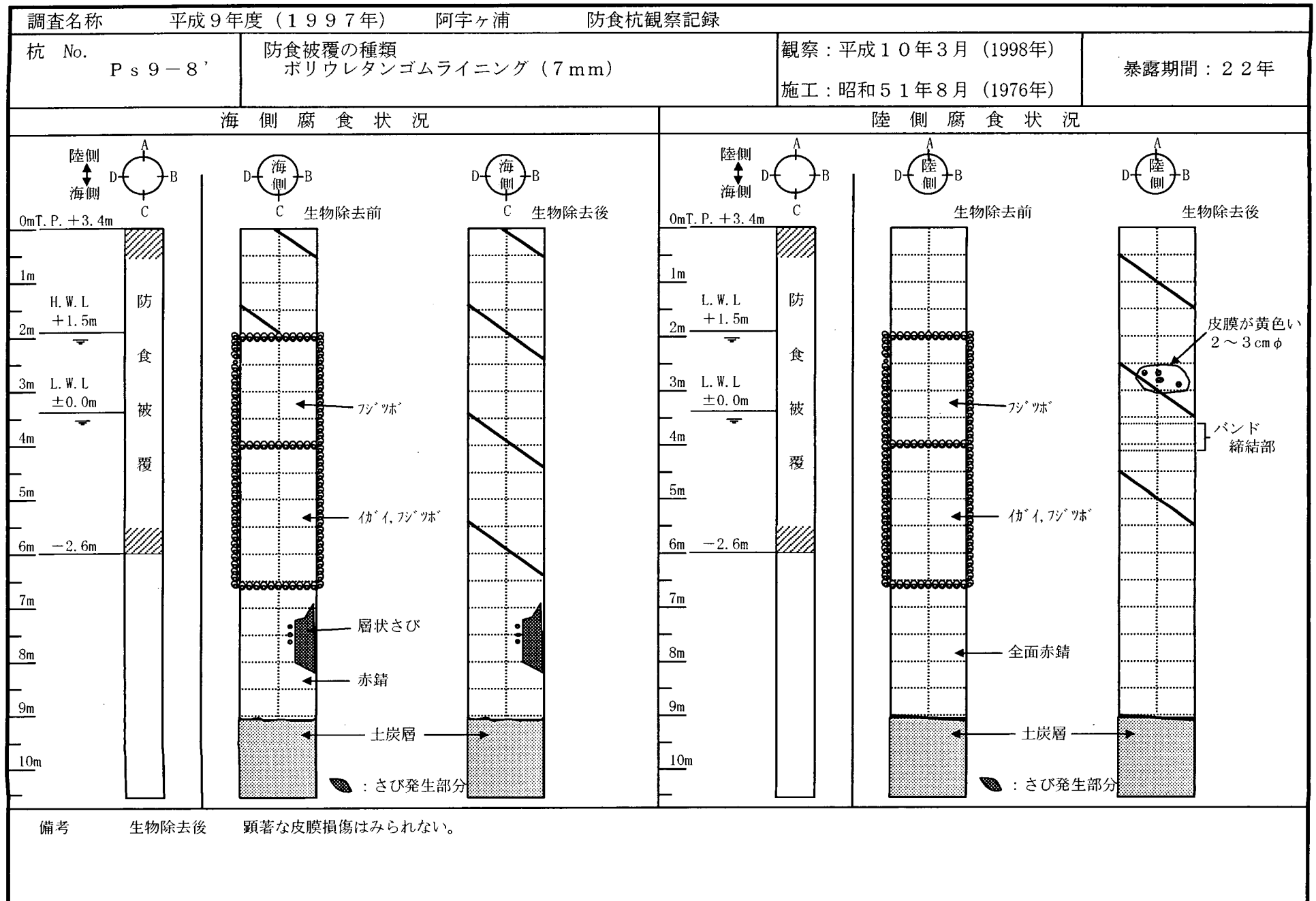


図 2.3-1 (16) 生物付着状況および被覆劣化状況

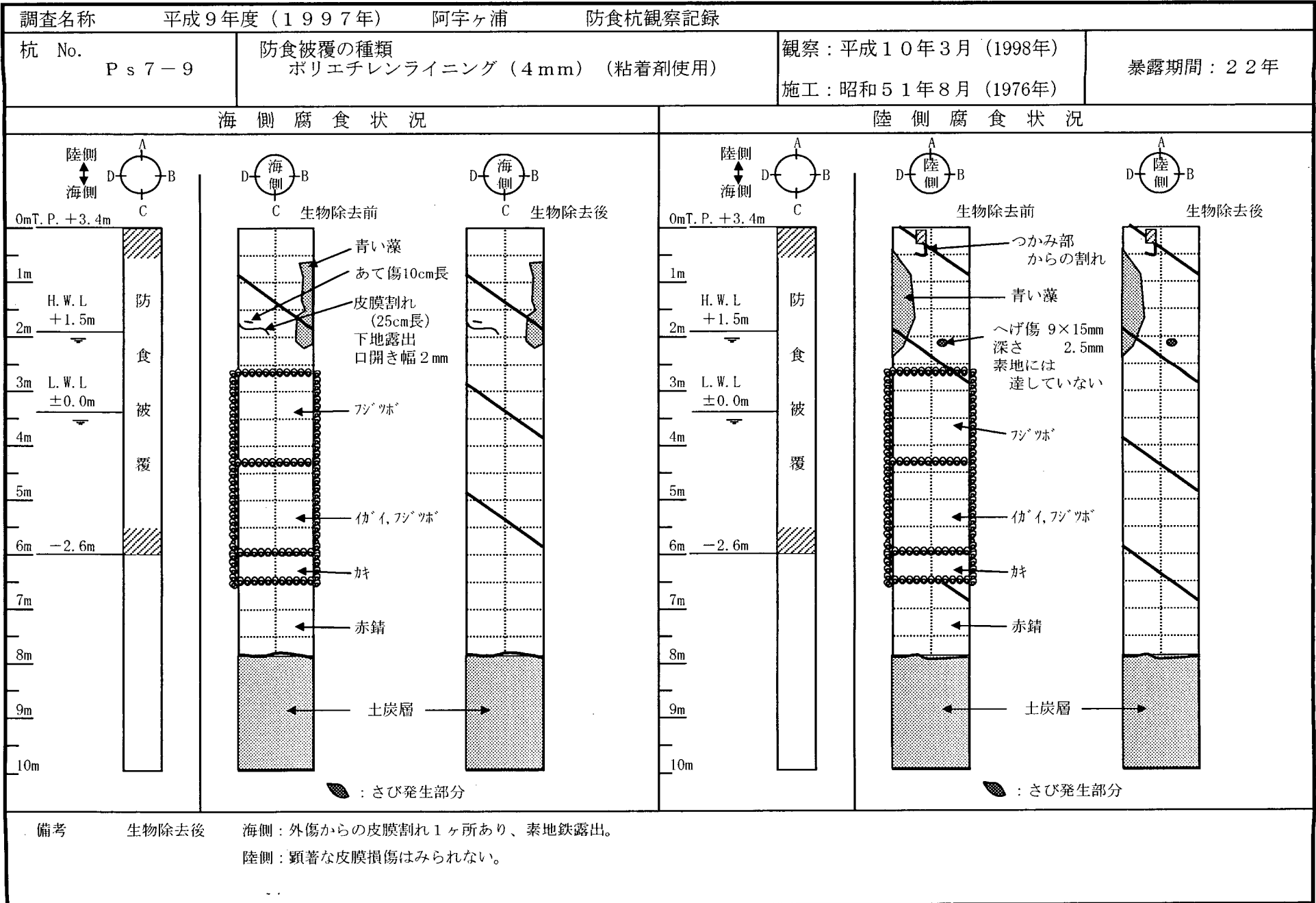


図 2.3-1 (17) 生物付着状況および被覆劣化状況

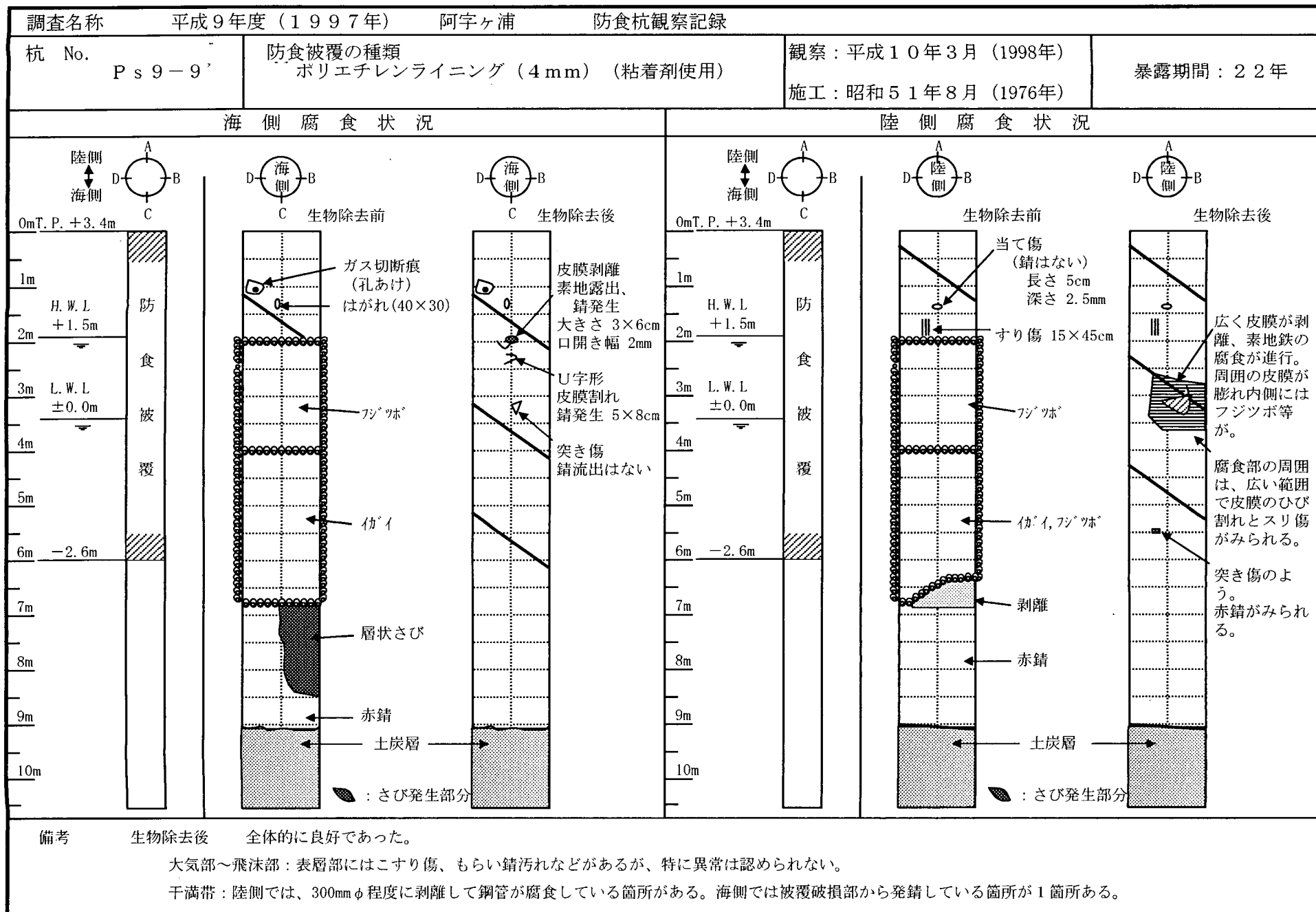


図 2.3-1 (18) 生物付着状況および被覆劣化状況

### 3. 2 付着生物除去後の外観目視観察

付着生物を、被覆に損傷を与えないように注意しながら、スクレーパー等を用いて剥離除去するとともに、たわし等で表面を清掃してから、防食被覆の劣化損傷状況や鋼材の腐食状況を調べ、引き続いて写真撮影を行なった。防食被覆の劣化損傷状況や鋼材の腐食状況の外観観察結果を表 2. 3-1 に、生物付着状況のスケッチと併せて図 2. 3-1 (1)～(18)にそれぞれ示す。

また、過去に行なったように、防食被覆の劣化・損傷状況から、その健全度を評価した結果を表 2. 3-2 (1) (2)に並記するとともに、過去の健全度評価結果と併せて、22 年間にわたる調査結果の経年変化を図 2. 3-2 にそれぞれ示す。

防食被覆の目視観察結果は、第 1 編 4 章に概要を述べたが、改めて整理してその要点を以下に示す。また、環境区分に分けた詳細な観察結果を表 2. 3-3 に示す。

#### (1) 無防食 (Ps9-1 : 図 2. 3-1 (1))

全長 16m の杭の杭頭を T. P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。当初この杭は、全長 16m を引き抜く予定であったが、諸般の都合で土丹層下での水中切断に切り替えたものである。

全面さびに覆われており、さび層が脱落している箇所やさび瘤となっている箇所が見られることから、全面腐食と局部腐食が並行して進行しているように思われる。

飛沫部上部は赤褐色さびで覆われ腐食が激しかったが、穿孔箇所はなかった。干満部は石灰質+錆の固着層で覆われ、海中部は貝+錆層、海土中部は土丹層+赤褐色錆層に覆われ、さびはとれやすく腐食はあまり激しくなかった (表 2. 3-3)。

この杭には、洗掘防止およびサンドエロージョン防止の目的で、海底面付近に予めガードリングが装着されていたが、ガードリングは、部分的にかなり腐食しているように見受けられた。詳細は肉厚測定結果のところで考察する。

Ps 9 以外 Ps 5～8 杭の海底近傍の無防食部では、漂砂による腐食磨耗が生じた。

#### (2) 耐海水鋼 (Cr-Al 系) (6mm) 巻き (Ps5-1' : 図 2. 3-1 (2))

全長 16m の杭の杭頭を T. P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

飛沫部や干満部では、厚いさび層に覆われ、さび瘤が一面に発生しており、局部腐食の傾向が大きいように推察され、耐海水鋼と炭素鋼の境が判別できない。

干満部～海中部は石灰質+さびの固着層で覆われていた。耐海水鋼巻きの下端から 10～20 cm 離れた海底近くの炭素鋼部分に直径 70mm 程度の貫通孔が 3 箇所発生していることから、サンドエロージョンのほかに、炭素鋼部分と耐海水鋼部分の間にマクロセルを形成し、局部腐食を加速した可能性も考えられる。

海土中部は土丹層+赤褐色さび層に覆われ、腐食はあまり激しくなかった。(表 2. 3-3)

#### (3) 無機ジンクリッチペイント (75 $\mu$ m) + タールエポキシ樹脂塗料 (300 $\mu$ m $\times$ 3)

(Ps5-2 : 図 2. 3-1 (3)、Ps7-2' : 図 2. 3-1 (4))

全長 16m の杭の杭頭を T. P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。引き抜き時にバイプロハンマのチャッキングにより防食被覆の上端につかみ傷が発生している。

2 本の杭のうち 5-2 杭にスパイラルビード部および運搬打ち込み時の損傷箇所からの腐食の進行が認められ、特に、飛沫部の垂直方向に長さが 1 m 以上にわたる連続したさび瘤が目立つ。他の 7-2' 杭には、スパイラルビード部に 2～3 箇所の花咲き状のさびの発生が認められる程度で、比較的良好である。し

かし、2本の杭とも過去の調査結果と比較すれば、腐食部分がやや拡大している。

干満部、海中部漂流物による打痕傷が成長したと推定されるさびの発生が多くみられた。溶接線沿いや杭長方向に引きずった直線状の傷跡からのさびが多く認められた点からダメージ傷からさびが成長したものと推定される。(表 2.3-3)

海中部防食被覆端から下の鋼表面は、漂砂によるエロージョンによるものとみられる不均一肉厚減が見られる。

土中部は、シルト分が付着しており、均一な薄い錆層で覆われている。鋼管内面は、スパイラル鋼管特有の溶接ビードの健全な姿が残っており、腐食はほとんど見られなかった。

#### (4) アルミニウム溶射(100 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス

(Ps6-3 : 図 2.3-1(5)、Ps8-3' : 図 2.3-1(6))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

2本の杭ともタールエポキシの塗膜のはく離が著しく、上端から T.P.  $\pm$ 0 付近までの被覆は被覆の痕跡がなく、一部に白色のアルミ溶射の腐食生成物が見られる他は、一面にさび瘤で覆われている。T.P.  $\pm$ 0 より下部は、どちらにもガラスクロスの一分が残存しているが、防食被覆としての機能はすでに失われていると推察される。ここに使用されているガラスクロスは、Ps6-4 に使用されているものより細かい。

アルミ材は本来鋼材より電位的に卑であるので、鋼材の電気防食に必要不可欠な金属材料とされていることから、海水環境より離れた場所で使われるべきで、飛沫部・干満部での用法には、一考の必要がある。

#### (5) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス

(Ps6-4 : 図 2.3-1(7)、Ps8-4' : 図 2.3-1(8))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

上部の塗膜は白垂が著しいが、2本の杭の 1 本(8-4'杭)の頂部付近に、傷からのさび瘤の発生が認められる程度で、腐食箇所は少なく全体的に良好な防食性を維持している。

ガラスクロスを塗膜内に挟んで塗膜を補強しているために、タールエポキシ樹脂塗料に比べてダメージ傷は少なく、フジツボなどの付着生物が素地に達する傷は認められないが、一部ガラスクロスの露出している箇所もあった。全体的には塗膜の劣化が進行し始めているが、まだ防食機能は維持されている。(表 2.3-3)

#### (6) ウレタンマスチックライニング(3mm, 骨材入り)

(Ps6-6 : 図 2.3-1(11)、Ps8-6' : 図 2.3-1(12))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

2本の杭とも大部分の被覆ははく離し、被覆が残存している部分でも、素地からと思われるふくれが発生し、防食被覆としての機能は完全に失われている。

#### (7) セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)

(Ps7-7 : 図 2.3-1(13)、Ps9-7' : 図 2.3-1(14))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m 以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

2本の杭のうち 9-7'杭は T.P.  $\pm$ 0 付近まで、他の 7-7'杭も T.P.  $\pm$ 1.3m 付近まで FRP カバーのはがれが進行し、セメントモルタルも一部脱落して肉薄となり鉄筋の露出箇所が多くなっており、上端部で

は露出した鋼材から錆が発生し腐食が進行していた。干満部下部、海中ではモルタルの一部にひびが発生している。防食被覆としての機能は低下していると推定される。また、残存しているFRP部分の被覆表面は、健全のように観察される。FRPカバーの脱落を防止、素材の耐候性や強度（厚み）を増強する保護策が必要である。（表 2.3-3）

**(8) ポリウレタンゴムライニング(7mm)** (Ps7-8 : 図 2.3-1(15)、Ps9-8' : 図 2.3-1(16))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

7-8 杭に、表層の被覆に広範囲の被覆のはがれが認められる。これは、曝露試験の初期からその兆候が認められたもので、発泡とともに施工の不備に起因するものと考えられる。しかし、もう 1 本の 9-8'杭には全く欠陥の発生は認められず、極めて良好な状態を維持していた。

9-8'杭では顕著な被膜損傷は見られなかったが、7-8 杭の海側では HWL 中心に上下 1 m 程の範囲で上層被膜がはく離し、下層被膜だけとなっている。この部分ではスパイラル溶接ビード上に錆発生部があり、その周囲に被膜下での腐食進展と思われる黒変部が広がっている。また、被膜はく離は陸側にも及んでいるが、はく離面積は海側より小さい。（表 2.3-3）

**(9) ポリエチレン押し出しライニング(4mm)(粘着剤仕様)**

(Ps7-9 : 図 2.3-1(17)、Ps9-9' : 図 2.3-1(18))

全長 16mの杭の杭頭を T.P. +340cm 位置でカットし、海底土中根入れ部は、硬質粘土層の 2 m以下の地点で水中カッターで切断し引き上げた。

9-9'杭の干満部に引き抜き工事の外力による直径 30cm 程度の大きな損傷と小さな損傷が各 1 箇所発生し、損傷箇所からの腐食の進行が認められるが、他の 7-9 杭には全く損傷や劣化は認められず、極めて良好な状態を維持している。被覆全般にわたって新品のつやは失われているが、異常はなく健全と観察された。（表 2.3-3）

以上、防食被覆の健全度の評価は、現状についてのみ忠実に評価しており、明らかな施工不良や打ち込み曝露後の外力による損傷が明らかとなった場合でも全く考慮していない。したがって、最終的な評価に際しては、これらのマイナス評価をある程度考慮する必要があると思われる。

このように考えると、目視観察結果から防食被覆の種類別に、その実用性を評価すると、ポリエチレン押し出しライニングとポリウレタンゴムライニングが共に最も優れており、次いで無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロスで、無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料もコストを考慮に入れば、十分に実用性があると言える。

表2.3-1 防食鋼管杭の外観観察結果まとめ（曝露22年）

| 杭<br>No | 防食被覆の種類                                           | 被覆の状況 |                                                                        |    |                                                                               | 生物の<br>付着状況                                                                                       |
|---------|---------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                   | 評価    | 大気～飛沫部                                                                 | 評価 | 干満部                                                                           |                                                                                                   |
| 1       | 無防食                                               | —     | 陸側では錆が脱落している。海側では全面が厚い錆層に覆われている。                                       | —  | 陸側では錆が脱落している。脱落していない部分では錆こぶ（20～80mmφ）が見られる。海側では全面が厚い錆層に覆われている。                | 全面錆で覆われているが、錆の程度は陸側の方がひどく、脱落していたり錆こぶになっている箇所もある。                                                  |
| 1'      | 耐海水鋼（Cr-A1系）<br>巻き（6mm）                           | —     | 全面が厚い錆層で覆われ海側、陸側とも20～80mmφの錆こぶが一面に点在している。                              | —  | 全面が厚い錆層で覆われ海側、陸側とも20～70mmφの錆こぶが一面に点在している。飛沫部に比べ錆こぶはやや小さい。                     | 飛沫部や干満部では全面が厚い錆層で覆われ錆こぶが一面に点在している。また、海底部では70mm程度の貫通穴が3箇所生じている。サビエーションや耐海水鋼と普通鋼との間のマッハ腐食が原因と考えられる。 |
| 2       | 無機ジंकリッチペイント<br>（75μ）+タールエポキシ<br>樹脂塗料（300μ×3）     | BC    | 陸側ではスパイラルビードに沿って塗膜剥離が数カ所あり赤錆が発生している。また、こすり傷箇所は孔食になっていた。その他は全体的に良好であった。 | BC | 陸側のこすり傷箇所は孔食になっていた。また、スパイラルビードに沿って錆が数カ所発生していた。その他は全体的に良好であった。                 | スパイラルビード部及びこすり傷部から発錆がみられるが、全体的に塗膜は良好であった。                                                         |
| 2'      |                                                   | BC    | 陸側ではスパイラルビードに沿って塗膜剥離が数カ所あり赤錆が発生している。また、こすり傷箇所は孔食になっていた。その他は全体的に良好であった。 | BC | 陸側のこすり傷箇所は孔食になっていた。また、スパイラルビードに沿って錆が数カ所発生していた。その他は全体的に良好であった。                 | スパイラルビード部及びこすり傷部から発錆がみられるが、全体的に塗膜は良好であった。                                                         |
| 3       | アルミニウム溶射（100μ）<br>+エポキシ樹脂塗料<br>（300μ×3）+ガラスクロス    | E     | タールエポキシはほとんど残存しておらず、無処理杭と同様に陸側では錆が脱落し、海側では全面が厚い錆層に覆われ、錆こぶが一面に点在していた。   | E  | タールエポキシはほとんど残存しておらず、陸側では錆の脱落や錆こぶがみられ、海側でも錆こぶが一面に点在していた。なお、錆こぶは陸側の方が大きい傾向にあった。 | ひろくタールエポキシの剥離が著しくほとんど赤錆が発生し、一部がアルミ溶射の白色生成物                                                        |
| 3'      |                                                   | E     | タールエポキシはほとんど残存しておらず、一面厚い錆層に覆われていた。                                     | E  | タールエポキシはほとんど残存しておらず、一面厚い錆層に覆われていた。また、一部にアルミ溶射の白色の腐食生成物が確認された。                 | 上部2/3はタールエポキシが剥離して発錆                                                                              |
| 4       | 無機ジंकリッチペイント<br>（75μ）+エポキシ樹脂塗料<br>（300μ×3）+ガラスクロス | B     | 全体的に良好であった。                                                            | AB | 全体的に良好であった。                                                                   | 上部は全体的に白亜化が著しいが、防食性は良好であった。                                                                       |
| 4'      |                                                   | B     | 陸側に一点、損傷箇所が孔食になっているところがあったが、その他は全体的に良好であった。                            | AB | 全体的に良好であった。                                                                   | 上部は全体的に白亜化が著しいが、防食性は良好であった。                                                                       |
| 5       | エポキシ系レジンモルタル<br>ライニング（4mm）                        | C     | 素地からの発錆と思われる斑点状の錆が全面に発生している。上部はもらい錆汁の汚れ著しい。                            | C  | 錆による着色がめだち素地からと思われる斑点状の錆が全面に発生している。                                           | 錆による着色がめだち素地からと思われる斑点状の錆が全面に発生している。                                                               |
| 5'      |                                                   | C     | 素地からの発錆と思われる斑点状の錆が全面に発生している。上部はもらい錆汁の汚れ著しい。                            | C  | 錆による着色がめだち素地からと思われる斑点状の錆が全面に発生している。                                           | 錆による着色がめだち素地からと思われる斑点状の錆が全面に発生している。                                                               |
| 6       | ウレタンマステックライ<br>ニング（3mm、骨材入り）                      | E     | 大きく剥離している箇所がある。また、残存している箇所では素地からと思われるふくれが多くみられる。                       | DE | 被覆はほとんど剥離しており、被覆が残存している箇所では素地からと思われるふくれが発生している。                               | 被覆はほとんど剥離しており、被覆が残存している箇所では素地からと思われるふくれが発生しており、被覆の機能を有していない。                                      |
| 6'      |                                                   | E     | 陸側ではまだ被覆が残存しているが素地からと思われるふくれが生じている。その他は被覆が剥離しており、層状さびが発生している。          | DE | 陸側ではまだ被覆が残存しているが素地からと思われるふくれが生じている。その他は被覆が剥離しており、層状さびが発生している。                 | 陸側ではまだ被覆が残存しているが素地からと思われるふくれが生じている。その他は被覆が剥離しており、層状さびが発生している。                                     |
| 7       | セメントモルタルライ<br>ニング（47mm）+ポリエ<br>ステルFRPカバー（3mm）     | DE    | FRPカバーが上端1.6mまで脱落、モルタル露出。一部脱落して鉄筋露出。                                   | DE | FRPカバーの海側では、溶接部と思われる箇所全体にクラックが入っている。また、陸側では3カ所10cm～50cm程度のクラックが生じている。         | FRPカバーは飛沫部の上部からクラックを起点として次第にゆるみ、割れが大きくなり脱落した。モルタルも一部脱落して鉄筋が露出している。                                |
| 7'      |                                                   | D     | 海側ではFRPカバーがはずれモルタルも肉薄になり、鉄筋が見える。陸側ではFRPカバーにクラックが生じている。                 | D  | 海側ではFRPカバーがはずれモルタルも肉薄になり、鉄筋が見える。陸側ではFRPカバーにクラックが生じている。                        | 海側ではFRPカバーがはずれモルタルも肉薄になり、鉄筋が見える。陸側ではFRPカバーにクラックが生じている。                                            |
| 8       | ポリウレタンゴムライ<br>ニング（7mm）                            | BC    | 海側では被覆の1層目が剥離している。                                                     | BC | 陸側の一部は被覆が残存しているが、海側や陸側の側面では被覆が1層剥離している。                                       | 陸側の一部は被覆が残存しているが、海側や陸側の側面では被覆が1層剥離している。しかし、防食機能は有していると思われる。                                       |
| 8'      |                                                   | AB    | 異常なし                                                                   | A  | 異常なし                                                                          | 異常なし                                                                                              |
| 9       |                                                   | A     | 異常なし                                                                   | A  | 異常なし                                                                          | 異常なし                                                                                              |
| 9'      | ポリエチレン押し出<br>しライニング（4mm）<br>（粘着剤使用）               | A     | 表層部にはこすり傷、もらい錆汚れなどがあるが、特に異常は認められない。                                    | BC | 陸側では、300mmφ程度に剥離して鋼管が腐食して、海側では被覆破損部から発錆している箇所が1箇所ある。                          | 干満部の一部になんらかの原因で被覆が剥離し、発錆している箇所があるが、その他は全体的に良好であった。                                                |

表2.3-2(1) 防食鋼管杭に対する評価順位の変化

| 杭No  | 被覆の種類                                                              | 曝露         | 大気～飛沫部 |     |     |     |     |     |     |    |    |
|------|--------------------------------------------------------------------|------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|      |                                                                    | 年度<br>経過年数 | 54     | 55  | 56  | 57  | 58  | 59  | 60  | 61 | 73 |
|      |                                                                    |            | 3.5    | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 | 11 | 22 |
| 9-1  | 無防食                                                                |            | —      | —   | —   | —   | —   | —   | —   | —  | —  |
| 5-1' | 耐海水鋼 (Cr-A1系)<br>巻き (6mm)                                          |            | —      | —   | —   | —   | —   | —   | —   | —  | —  |
| 5-2  | 無機ジンクリッチペイント<br>(75 $\mu$ ) + タールエポキシ<br>樹脂塗料 (300 $\mu$ × 3)      |            | AB     | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | BC |
| 7-2' |                                                                    |            | AB     | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | BC |
| 6-3  | アルミニウム溶射 (100 $\mu$ ) +<br>エポキシ樹脂塗料 (300 $\mu$ × 3)<br>+ ガラスクロス    |            | B      | B   | B   | C   | D   | D   | D   | DE | E  |
| 8-3' |                                                                    |            | B      | B   | B   | C   | D   | D   | D   | DE | E  |
| 6-4  | 無機ジンクリッチペイント<br>(75 $\mu$ ) + エポキシ樹脂塗料<br>(300 $\mu$ × 3) + ガラスクロス |            | AB     | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | B  |
| 8-4' |                                                                    |            | AB     | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | B  |
| 6-5  | エポキシ系レジンモルタル<br>ライニング (4mm)                                        |            | AB     | AB  | B   | BC  | BC  | BC  | BC  | BC | C  |
| 8-5' |                                                                    |            | AB     | AB  | B   | BC  | BC  | BC  | BC  | BC | C  |
| 6-6  | ウレタンマスチックライニ<br>ング (3mm, 骨材入り)                                     |            | C      | C   | C   | C   | C   | CD  | D   | DE | E  |
| 8-6' |                                                                    |            | C      | C   | C   | C   | C   | CD  | D   | DE | E  |
| 7-7  | セメントモルタルライニン<br>グ (47mm) + ポリエス<br>テルFRPカバー (3mm)                  |            | A      | A   | A   | A   | A   | AB  | AB  | B  | DE |
| 9-7' |                                                                    |            | A      | A   | A   | A   | A   | AB  | AB  | B  | D  |
| 7-8  | ポリウレタンゴムライニン<br>グ (7mm)                                            |            | A      | A   | A   | A   | A   | AB  | AB  | AB | BC |
| 9-8' |                                                                    |            | A      | A   | A   | A   | A   | AB  | AB  | AB | AB |
| 7-9  | ポリエチレン押出しライニ<br>ング (4mm)<br>(粘着剤使用)                                |            | A      | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | A  |
| 9-9' |                                                                    |            | A      | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | A  |

表2.3-2(2) 防食鋼管杭に対する評価順位の変化

| 杭No  | 被覆の種類                                                     | 曝露         | 干 満 部 |     |     |     |     |     |     |    |    |
|------|-----------------------------------------------------------|------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|      |                                                           | 年度<br>経過年数 | 54    | 55  | 56  | 57  | 58  | 59  | 60  | 61 | 73 |
|      |                                                           |            | 3.5   | 4.5 | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 | 11 | 22 |
| 9-1  | 無防食                                                       |            | —     | —   | —   | —   | —   | —   | —   | —  | —  |
| 5-1' | 耐海水鋼 (C r - A l 系)<br>巻き (6 mm)                           |            | —     | —   | —   | —   | —   | —   | —   | —  | —  |
| 5-2  | 無機ジンクリッチペイント<br>(75 μ) + タールエポキシ<br>樹脂塗料 (300 μ × 3)      |            | AB    | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | BC |
| 7-2' |                                                           |            | AB    | AB  | B   | B   | B   | B   | B   | B  | BC |
| 6-3  | アルミニウム溶射(100 μ) +<br>エポキシ樹脂塗料(300 μ × 3)<br>+ ガラスクロス      |            | C     | C   | C   | D   | DE  | DE  | DE  | DE | E  |
| 8-3' |                                                           |            | C     | C   | C   | D   | DE  | DE  | DE  | DE | E  |
| 6-4  | 無機ジンクリッチペイント<br>(75 μ) + エポキシ樹脂塗料<br>(300 μ × 3) + ガラスクロス |            | A     | A   | A   | A   | AB  | AB  | AB  | AB | AB |
| 8-4' |                                                           |            | A     | A   | A   | A   | AB  | AB  | AB  | AB | AB |
| 6-5  | エポキシ系レジンモルタル<br>ライニング (4 mm)                              |            | A     | A   | A   | B   | B   | B   | B   | B  | C  |
| 8-5' |                                                           |            | A     | A   | A   | B   | B   | B   | B   | B  | C  |
| 6-6  | ウレタンマスチックライ<br>ニング (3 mm, 骨材入り)                           |            | C     | C   | C   | CD  | D   | D   | D   | DE | E  |
| 8-6' |                                                           |            | C     | C   | C   | CD  | D   | D   | D   | DE | E  |
| 7-7  | セメントモルタルライ<br>ニング (4 7 mm) + ポリエ<br>ステル F R P カバー (3 mm)  |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | DE |
| 9-7' |                                                           |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | D  |
| 7-8  | ポリウレタンゴムライ<br>ニング (7 mm)                                  |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | BC |
| 9-8' |                                                           |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | A  |
| 7-9  | ポリエチレン押出しライ<br>ニング (4 mm)<br>(粘着剤使用)                      |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | A  |
| 9-9' |                                                           |            | A     | A   | A   | A   | A   | A   | A   | A  | BC |

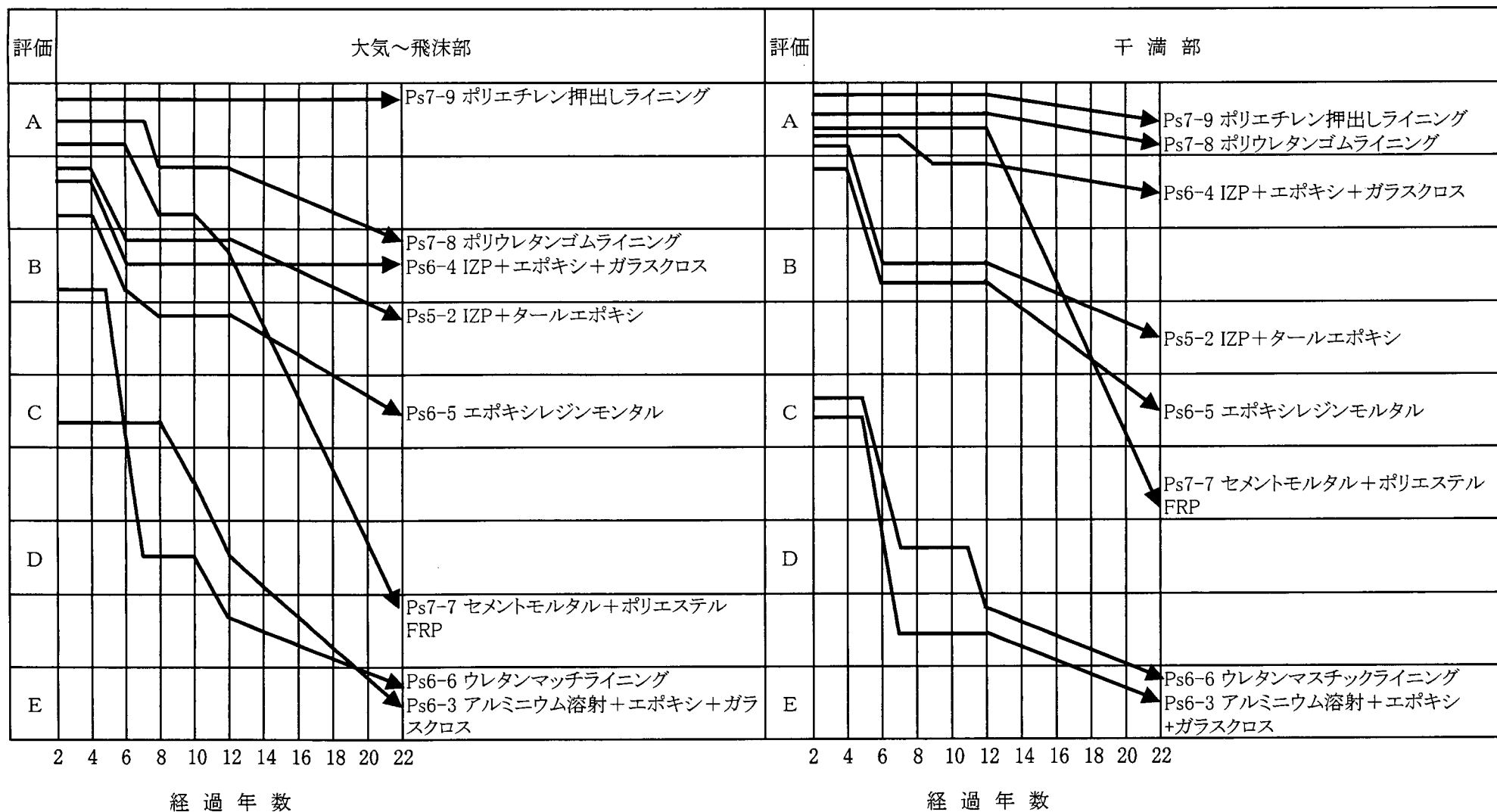


図2.3-2 防食鋼管杭暴露試験観察結果

表2.3-3 詳細調査対象防食系の詳細観察結果

| 防食系                  | 杭No.        | 外観・被覆状況                                                         |                                                                    |                                                                                              |                                                                |
|----------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                      |             | 飛沫部                                                             | 干満部                                                                | 海中部                                                                                          | まとめ                                                            |
| 炭素鋼<br>無防食           | 9-1         | 飛沫部上部は黄・赤褐色錆下に黒褐色錆で覆われ、下部は赤褐色錆＋白色の石灰層で覆われ、腐食は大きかった。             | 全面に赤褐色錆＋白色の石灰層で覆われしっかりと固着していた。                                     | 全面に赤褐色錆、白色石灰、黒色の貝付着層で覆われ簡単に脱落した。海土中は土炭層下に赤褐色の錆層があり腐食は少なかった。                                  | 飛沫部上部は腐食が激しく、干満部、海中部は貝＋錆層、海土中部は土炭層＋赤褐色錆層に覆われ、腐食はあまり激しくなかった。    |
| 耐海水鋼<br>被覆           | 5-1'        | 赤褐色の層状さびに覆われ、腐食は大きかった。                                          | 全面に赤褐色さび＋白色の石灰層で覆われ、しっかりと固着していた。                                   | 被覆領域は全面に赤褐色さび、白色石灰、黒色の貝付着層で覆われ、簡単に脱落した。被覆領域直下の下地鋼管にいくつか貫通孔が見られた。海土中は土炭層下に赤褐色のさび層があり腐食は少なかった。 | 飛沫部の腐食は激しかったが、干満部～海中部の被覆領域は被覆の腐食は少なかった。但し被覆領域直下の下地鋼管の貫通孔が見られた。 |
| タールエ<br>ポキシ          | 5-2<br>7-2' | 塗膜微小われ部があり、スパイラルビードに沿った傷部および管長方向の擦り傷から赤錆が発生していた。部分的赤錆箇所が散在していた。 | 海側に塗膜剥離箇所があり、赤錆が発生していた。その他は全般的に良好であった。                             | 錆発生箇所は干満部より面積は小さく少ないが散在しており比較的良好であった。                                                        | 飛沫部のスパイラルビード、こすり傷部から赤錆が発生していた。全般的に塗膜は良好であるが、徐々に劣化は進行している。      |
| エポキシ<br>＋ガラス<br>クロス  | 6-4<br>8-4' | 塗膜が剥離し、ガラスクロスが露出している部分が認められた。ダメージ傷からの発錆が少なく、全体的に良好であった。         | 8-4'の表層の塗膜の一部が剥離してガラスクロスが露出している箇所があったが発錆は認められなかった。上記以外は全体的に良好であった。 | 錆発生箇所は干満部より面積は小さく少ないが散在しており比較的良好であった。                                                        | 一部に表層塗膜が剥離してガラスクロスの露出箇所があったが、全体にダメージ着ずからの発錆も少なく良好な状態であった。      |
| セメント<br>モルタル<br>＋FRP | 7-7<br>9-7' | 7-7'の陸側を除いてFRPカバーが飛沫部全域で脱落、モルタル露出、一部金網、鉄筋が露出、上端部では鋼材からの錆が発生。    | FRPカバーが干満部上部で一部剥離、下部で一部ひび割れがあるが、モルタル中金網、鉄筋や素地まで腐食していない。            | FRPカバーが干満部下部で一部ひび割れがあるが、モルタル中金網、鉄筋や素地まで腐食していない。                                              | 飛沫部全域で脱落、モルタル露出、一部金網、鉄筋が露出、上端部では鋼材からの錆が発生。干満部下部、海中部で一部ひび発生。    |
| ポリウレ<br>タン           | 7-8<br>9-8' | 9-8'は異常なし、7-8はHWLを中心に上下1m程第1層剥離、下層皮膜だけになっている。                   | 9-8'は異常なし、7-8は海、陸側の側面で第1層目が剥離している。                                 | 良好。                                                                                          | 海、陸側の側面で第1層剥離をしているものがあるが、防食機能は健全である。                           |
| ポリエチ<br>レン           | 7-9<br>9-9' | もらい錆などがあるが、異常なし。                                                | 7-9は異常なし、9-9'は陸側の塗膜剥離や海側の損傷部から発錆している。                              | 良好。                                                                                          | 干満部の一部で被覆が剥離し、発錆していたが、全体的に良好。                                  |

### 3. 3肉厚測定

鋼管杭各部の腐食やサンドエロージョンによる肉厚の減少を調べるため、超音波厚さ計により防食鋼管杭の中から一部の杭やガードリングの肉厚を測定した。測定は、深度に応じた測定点ごとの肉厚を計測している。測定結果を表2.3-4(1)～(6)に示す。

なお、測定値は、使用した鋼管の仕様肉厚を初期値とする肉厚減少値の平均値および最大値をもって表示した。

測定結果から、以下のことが考察される。

(1) Ps 5 に設置されていた無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料の防食鋼管杭の被覆部より下の無被覆部の平均腐食量は、4～6mm、Ps 9 に設置されていたポリエチレン押し出しライニングを施した防食鋼管杭の被覆部より下の無被覆部の平均腐食量は6～7mmの値を示し、この部位の腐食が非常に大きいことを示しているが、これらの部位が漂砂の移動が激しい部位に該当していることから、サンドエロージョンの影響と見ることができる。

(2) 上記防食鋼管杭の腐食の大きい部位に相当する無防食杭 (Ps 9 に設置) のT.P. - 3 m付近の平均腐食量は1mm以下と少ないが、これは、この杭にはサンドエロージョンを防止する目的でガードリングと呼ばれる鞘管が杭の外側に設置されていたためと考えられ、ガードリングの平均腐食量が最も大きい部位で7～9mmを示していることがそれを裏付けているように思われる。

表2.3-4(1) 耐海水鋼(Cr-Al系)(6mm)巻き

| 測定点<br>(深度) | 海 側  |        |      |        | 陸 側  |        |       |        |
|-------------|------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|
|             | 平均値  | 平均腐食速度 | 最大値  | 最大腐食速度 | 平均値  | 平均腐食速度 | 最大値   | 最大腐食速度 |
| T.P. -2.9m  | 0.97 | 0.044  | 1.30 | 0.059  | 9.77 | 0.444  | 11.22 | 0.510  |
| -3.2        | 1.86 | 0.085  | 2.66 | 0.121  | 3.39 | 0.154  | 4.39  | 0.200  |
| -3.5        | 1.32 | 0.060  | 1.46 | 0.066  | 1.27 | 0.058  | 2.47  | 0.112  |
| -4.0        | 1.85 | 0.084  | 1.99 | 0.090  | 1.46 | 0.066  | 1.59  | 0.072  |
| -4.5        | 0.89 | 0.041  | 0.98 | 0.045  | 1.49 | 0.068  | 1.65  | 0.075  |

(単位 平均値、最大値：mm、腐食速度：mm/yr)

表2.3-4(2) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)

| 測定点<br>(深度) | 海 側  |        |      |        | 陸 側  |        |      |        |
|-------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
|             | 平均値  | 平均腐食速度 | 最大値  | 最大腐食速度 | 平均値  | 平均腐食速度 | 最大値  | 最大腐食速度 |
| T.P. -2.9m  | 5.91 | 0.269  | 6.35 | 0.289  | 6.47 | 0.307  | 7.48 | 0.340  |
| -3.2        | 4.06 | 0.185  | 4.60 | 0.209  | 4.55 | 0.207  | 5.31 | 0.241  |
| -3.5        | 0.92 | 0.042  | 1.70 | 0.077  | 0.30 | 0.014  | 0.41 | 0.019  |
| -4.0        | 0.48 | 0.022  | 0.64 | 0.029  | 0.25 | 0.011  | 0.40 | 0.018  |
| -4.5        | 0.52 | 0.024  | 0.58 | 0.021  | 0.69 | 0.031  | 0.96 | 0.044  |

(単位 平均値、最大値：mm、腐食速度：mm/yr)

表2.3-4(3) ポリエチレン押し出しライニング

| 測定点<br>(深度) | 海 側  |             |      |             | 陸 側  |             |      |             |
|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
|             | 平均値  | 平 均<br>腐食速度 | 最大値  | 最 大<br>腐食速度 | 平均値  | 平 均<br>腐食速度 | 最大値  | 最 大<br>腐食速度 |
| T.P. -2.9m  | 3.03 | 0.138       | 4.38 | 0.119       | 3.99 | 0.181       | 4.66 | 0.212       |
| -3.2        | 7.22 | 0.328       | 7.56 | 0.344       | 6.91 | 0.314       | 7.59 | 0.345       |
| -3.5        | 5.69 | 0.259       | 6.00 | 0.273       | 6.84 | 0.311       | 7.06 | 0.321       |
| -4.0        | 2.58 | 0.117       | 3.66 | 0.166       | 2.80 | 0.127       | 4.50 | 0.205       |
| -4.5        | 0.50 | 0.023       | 0.63 | 0.029       | 0.82 | 0.037       | 1.10 | 0.050       |

(単位 平均値、最大値：mm、腐食速度：mm/yr)

表2.3-4(4) 無防食 (裸杭)

| 測定点<br>(深度) | 海 側  |             |      |             | 陸 側  |             |      |             |
|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
|             | 平均値  | 平 均<br>腐食速度 | 最大値  | 最 大<br>腐食速度 | 平均値  | 平 均<br>腐食速度 | 最大値  | 最 大<br>腐食速度 |
| T.P. +3.0m  | 7.10 | 0.323       | 7.29 | 0.331       | 2.96 | 0.135       | 3.99 | 0.181       |
| +2.0        | 6.82 | 0.310       | 7.04 | 0.320       | 4.19 | 0.191       | 4.87 | 0.221       |
| +1.0        | 3.43 | 0.156       | 3.75 | 0.170       | 3.78 | 0.172       | 4.29 | 0.195       |
| ±0          | 0.37 | 0.017       | 0.49 | 0.022       | 0.19 | 0.008       | 0.28 | 0.013       |
| -1.0        | 0.49 | 0.022       | 0.85 | 0.039       | 0.05 | 0.002       | 0.11 | 0.005       |
| -2.0        | 0.14 | 0.006       | 0.17 | 0.008       | 0.15 | 0.007       | 0.19 | 0.009       |
| -3.0        | 0.77 | 0.035       | 1.01 | 0.046       | 0.54 | 0.024       | 0.76 | 0.035       |
| -4.0        | 0.22 | 0.010       | 0.40 | 0.018       | 0.03 | 0.002       | 0.05 | 0.002       |
| -5.0        | 0.08 | 0.004       | 0.12 | 0.005       | 0.18 | 0.008       | 0.21 | 0.010       |
| -6.0        | 0.09 | 0.004       | 0.19 | 0.009       | 0.09 | 0.004       | 0.12 | 0.005       |
| -7.0        | 0.02 | 0.001       | 0.04 | 0.002       | 0.12 | 0.005       | 0.16 | 0.007       |

(単位 平均値、最大値：mm、腐食速度：mm/yr)

表2.3-4(5) ガードリング No. 1

| 測定点<br>(深度) | A 側  |            |      |            | B 側  |            |      |            |
|-------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
|             | 平均値  | 平均<br>腐食速度 | 最大値  | 最大<br>腐食速度 | 平均値  | 平均<br>腐食速度 | 最大値  | 最大<br>腐食速度 |
| T.P. -3.1m  | 3.62 | 0.165      | 4.12 | 0.187      | 6.46 | 0.293      | 7.64 | 0.347      |
| -3.4        | 3.21 | 0.146      | 4.39 | 0.200      | 5.50 | 0.250      | 6.55 | 0.298      |
| -3.7        | 5.94 | 0.270      | 6.56 | 0.298      | 4.46 | 0.203      | 5.36 | 0.244      |
| -4.0        | 6.93 | 0.315      | 7.54 | 0.343      | 7.12 | 0.324      | 7.38 | 0.335      |
| -4.3        | 7.05 | 0.320      | 7.19 | 0.327      | 7.51 | 0.341      | 8.20 | 0.373      |
| -4.6        | 3.75 | 0.171      | 4.73 | 0.215      | 5.01 | 0.228      | 6.29 | 0.286      |
| -4.9        | 1.56 | 0.071      | 1.76 | 0.080      | 3.61 | 0.164      | 4.94 | 0.225      |

注) 正確なT.P.の位置は不明であるが、おおよそT.P. -3m~T.P. -5mの範囲とは推定される。

表2.3-4(6) ガードリング No. 2

| 測定点<br>(深度) | A 側  |            |      |            | B 側  |            |      |            |
|-------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
|             | 平均値  | 平均<br>腐食速度 | 最大値  | 最大<br>腐食速度 | 平均値  | 平均<br>腐食速度 | 最大値  | 最大<br>腐食速度 |
| T.P. -3.1m  | 5.77 | 0.262      | 7.67 | 0.349      | 5.10 | 0.232      | 5.94 | 0.270      |
| -3.4        | 6.07 | 0.276      | 6.75 | 0.307      | 6.21 | 0.282      | 6.32 | 0.287      |
| -3.7        | 8.44 | 0.384      | 9.38 | 0.433      | 6.13 | 0.279      | 6.35 | 0.289      |
| -4.0        | 9.00 | 0.409      | 9.53 | 0.433      | 7.37 | 0.335      | 7.64 | 0.347      |
| -4.3        | 6.03 | 0.274      | 7.13 | 0.324      | 7.29 | 0.331      | 7.37 | 0.335      |
| -4.6        | 2.08 | 0.095      | 2.34 | 0.106      | 2.85 | 0.130      | 3.73 | 0.170      |
| -4.9        | 1.60 | 0.073      | 2.05 | 0.093      | 1.35 | 0.061      | 1.44 | 0.065      |

注) 正確なT.P.の位置は不明であるが、おおよそT.P.-3m~T.P.-5mの範囲とは推定される。

### 3. 4 防食被覆厚測定

防食鋼管杭の被覆厚測定結果を表 2.3-5 に示す。被覆厚は、仕様の被覆厚と比較する意味で測定したものであるが、測定器の性能上の制約から、正確な測定ができないものがあったので、信頼できると判断されたものだけを選んで参考までに示した。測定結果から、仕様とはかなり異なるものもあるが、過去の実測値と比較すればほぼ同程度の値であることが判る。

表2.3-5 防食被覆の厚さ測定結果 (単位  $\mu\text{m}$ )

| 杭番号                      | 膜厚 | 測定位置 (T.P. m) |        |        |        |        |        |
|--------------------------|----|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          |    | + 2. 8        | + 1. 8 | + 0. 8 | - 0. 2 | - 1. 2 | - 2. 2 |
| Ps5-2<br>(初期膜厚)<br>1040  | ①  | 981           | 934    | 1003   | 1434   | 1100   | 926    |
|                          | ②  | 885           | 942    | 934    | 1451   | 978    | 915    |
|                          | ③  | 1084          | 931    | 1084   | 1541   | 1011   | 1082   |
|                          | 平均 | 983           | 936    | 1007   | 1475   | 1030   | 974    |
| Ps6-4<br>(初期膜厚)<br>1100  | ①  | 940           | 1101   | 833    | 1030   | 1087   | 755    |
|                          | ②  | 998           | 993    | 952    | 1163   | 1057   | 766    |
|                          | ③  | 938           | 1032   | 862    | 1186   | 1072   | 735    |
|                          | 平均 | 959           | 1042   | 882    | 1126   | 1072   | 752    |
| Ps7-2'<br>(初期膜厚)<br>1100 | ①  | 1312          | 1112   | 1291   | 1467   | 1389   | 1458   |
|                          | ②  | 1241          | 1184   | 1424   | 1592   | 1489   | 1425   |
|                          | ③  | 1355          | 1141   | 1228   | 1480   | 1597   | 1336   |
|                          | 平均 | 1303          | 1146   | 1314   | 1513   | 1492   | 1406   |
| Ps7-9<br>(初期膜厚)<br>4200  | ①  | 5900          | 6250   | 6400   | 6300   | 6200   | 6400   |
|                          | ②  | 6100          | 6100   | 6400   | 6000   | 6100   | 6050   |
|                          | ③  | 5850          | 6400   | 6000   | 6300   | 6100   | 6100   |
|                          | 平均 | 5950          | 6250   | 6267   | 6200   | 6133   | 6183   |
| Ps8-4'<br>(初期膜厚)<br>1100 | ①  | 1363          | 1315   | 1297   | 1547   | 1158   | 1040   |
|                          | ②  | 1351          | 1341   | 1357   | 1581   | 1231   | 1049   |
|                          | ③  | 1294          | 1359   | 1233   | 1500   | 1292   | 1419   |
|                          | 平均 | 1336          | 1338   | 1296   | 1543   | 1227   | 1169   |
| Ps9-8'<br>(初期膜厚)<br>4000 | ①  | 4800          | 3700   | 3600   | 3600   | 3600   | 3800   |
|                          | ②  | 4700          | 4000   | 3700   | 3700   | 3600   | 3800   |
|                          | ③  | 4600          | 4200   | 4000   | 3800   | 3800   | 4200   |
|                          | 平均 | 4700          | 3967   | 3767   | 3700   | 3667   | 3933   |
| Ps9-9'<br>(初期膜厚)<br>4600 | ①  | 6400          | 6200   | 6320   | 5800   | 6000   | 6200   |
|                          | ②  | 6250          | 6100   | 6000   | 6200   | 5900   | 6400   |
|                          | ③  | 6300          | 6200   | 6150   | 6200   | 6000   | 6300   |
|                          | 平均 | 6317          | 6167   | 6157   | 6067   | 5967   | 6300   |

(注) その他の杭については、用意した膜厚計では正確な測定ができなかった。

## 4. 詳細調査結果

詳細調査では、調査対象杭の付着生物除去後の目視による外観観察、その後無防食鋼管杭や防食鋼管杭からさらに小試験体を採取し、被覆層や素地の腐食防食特性に関する各種試験・調査を詳細に行った。

### 4. 1 詳細調査対象杭の外観

詳細調査対象杭の目視による微視的な観察結果は整理の便宜上、「第2編3.2生物除去後の外観目視観察」のそれぞれの該当する防食系の項に併記した。また、外観詳細観察結果のまとめを表2.3-3に示す。同表において干満部上部と下部は外観はほぼ同程度であったので、各部位として飛沫部、干満部、海中部でまとめた。

### 4. 2 無防食(炭素鋼無処理)鋼管杭の調査

Ps9-1杭の除錆後の海側と陸側に面した上端から下端まで試験片を採取し、2.2に示した調査方法に従って25cm間隔で素地表面の腐食状況の写真撮影・外観観察、鋼管杭の管長方向板厚及び孔食部板厚を測定して板厚減少量(腐食量)と孔食深さの平均値と最大値を求め、またこれらの値をもとに鋼管杭の初期公称板厚(14mm厚)と曝露期間(22年)から腐食速度の値を計算した。

#### (1) 除錆後の素地表面外観

鋼管杭の上端の海洋大気～飛沫部は海側の腐食が最も激しく、表面の凹凸が大きい。飛沫部下部から干満部下部にかけては腐食による表面の凹凸は海側が比較的小さく、海中部では再び表面凹凸がやや大きくなり、海土中部ではほとんど腐食はみられず平滑な表面を有している。飛沫部では陸側の凹凸が海側より大きく感じられるが他の部位の凹凸はほぼ同程度と観察される。

#### (2) 板厚減少量

除錆後の板厚と孔食部最小板厚の測定結果および板厚減少量、孔食深さ(孔食部最大板厚減少量)、腐食速度、最大孔食速度等の計算結果を表2.4-1(海側)、表2.4-2(陸側)に示す。また板厚減少量(腐食速度)のプロフィールを図2.4-1に、各部位別の平均腐食速度と最大孔食速度のまとめを表2.4-3に示す。

鋼管杭の管長方向の板厚減少量のプロフィールから飛沫部で腐食が最も激しく、この部位では海側(平均0.157mm/yr)が陸側(0.125mm/yr)より大きく、最大板厚減少量は海側で7.09mm(0.32mm/yr、海側No.3)、陸側は4.80mm(0.22mm/yr、海側No.6)であった。ついで海中部の腐食が大きく、海側と陸側の差は少なく(平均0.03mm/yr)、この部位の最大板厚減少量は海側1.11mm(0.05mm/yr、海側No.22)、陸側は1.48mm(0.067mm/yr、陸側No.21)であった。

干満部の腐食は海中より小さく、やや海側(平均0.25～0.03mm/yr)が陸側(0.02mm/yr)より大きかった。干満部下部/海中部間のマクロセル腐食傾向が若干みられ、アノード部位の海中部の集中腐食傾向が少しあったが、カソード部位の干満部下部の腐食減少傾向は小さかった。この部位では白色の付着貝類の石灰質で覆われ、この層が防食効果を示したと考えられる。

また、土中の板厚減少は0.4mm(0.02mm/yr)でもっとも小さく、海底部の海水/土中のマクロセルによる腐食や漂砂による腐食磨耗はほとんどみられなかった。(表2.4-3)

#### (3) 孔食深さ

鋼管杭の管長方向の孔食深さのプロフィールも板厚減少量のものと同様な傾向であり、土中<干満部<海中部<飛沫部の順に腐食が激しくなり、海側が陸側より大きかった。飛沫部の最大孔食深さは海側で8.09mm(0.37mm/yr、海側No.3)、陸側は7.53mm(0.34mm/yr、陸側No.6)であり、ついで海中部では海側1.95mm(0.089mm/yr、海側No.20)、陸側は1.83mm(0.083mm/yr、陸側No.21)と小さかった。(表2.4-3)

表2.4-1 板厚測定結果(Ps9-1,海側)

| 部位        | 番号  | 杭長<br>(m) | 板厚測定値(mm) |        |        |        |        |        | 板厚減少量<br>(mm) | 腐食速度<br>(mm/yr) | 孔食部板厚<br>(mm) | 孔食深さ<br>(mm) | 孔食速度<br>(mm/yr) |
|-----------|-----|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|
|           |     |           | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      | 平均     |               |                 |               |              |                 |
| 飛沫部       | 1   | 0.00      | 8.739     | 8.383  | 8.169  | 7.964  | 8.401  | 8.331  | 5.669         | 0.258           | 7.985         | 6.015        | 0.273           |
|           | 2   | 0.25      | 8.203     | 8.017  | 8.037  | 7.902  | 7.708  | 7.973  | 6.027         | 0.274           | 6.828         | 7.172        | 0.326           |
|           | 3   | 0.50      | 7.409     | 6.967  | 6.882  | 6.901  | 6.398  | 6.911  | 7.089         | 0.322           | 5.913         | 8.087        | 0.368           |
|           | 4   | 0.75      | 12.886    | 12.813 | 13.039 | 13.200 | 12.704 | 12.928 | 1.072         | 0.049           | 12.503        | 1.497        | 0.068           |
|           | 5   | 1.00      | 11.297    | 11.223 | 11.093 | 11.427 | 11.369 | 11.282 | 2.718         | 0.124           | 10.269        | 3.731        | 0.170           |
|           | 6   | 1.25      | 9.622     | 10.160 | 9.428  | 10.176 | 10.126 | 9.902  | 4.098         | 0.186           | 8.815         | 5.185        | 0.236           |
|           | 7   | 1.50      | 13.321    | 13.369 | 13.437 | 13.540 | 13.669 | 13.467 | 0.533         | 0.024           | 12.689        | 1.311        | 0.060           |
|           | 8   | 1.75      | 13.509    | 13.383 | 13.682 | 13.351 | 13.518 | 13.489 | 0.511         | 0.023           | 12.887        | 1.113        | 0.051           |
|           | 平均値 |           | 10.623    | 10.539 | 10.471 | 10.558 | 10.487 | 10.536 | 3.464         | 0.157           | 9.736         | 4.264        | 0.194           |
| 干満部<br>上部 | 9   | 2.00      | 13.301    | 12.455 | 13.377 | 13.236 | 13.358 | 13.145 | 0.855         | 0.039           | 11.737        | 2.263        | 0.103           |
|           | 10  | 2.25      | 13.347    | 13.376 | 13.228 | 13.164 | 13.000 | 13.223 | 0.777         | 0.035           | 12.396        | 1.604        | 0.073           |
|           | 11  | 2.50      | 13.428    | 13.447 | 13.439 | 13.468 | 13.444 | 13.445 | 0.555         | 0.025           | 12.799        | 1.201        | 0.055           |
|           | 平均値 |           | 13.359    | 13.093 | 13.348 | 13.289 | 13.267 | 13.271 | 0.729         | 0.033           | 12.311        | 1.689        | 0.077           |
| 干満部<br>下部 | 12  | 2.75      | 13.377    | 13.760 | 13.487 | 13.311 | 13.586 | 13.504 | 0.496         | 0.023           | 12.774        | 1.226        | 0.056           |
|           | 13  | 3.00      | 13.609    | 13.479 | 13.252 | 13.607 | 13.524 | 13.494 | 0.506         | 0.023           | 12.687        | 1.313        | 0.060           |
|           | 14  | 3.25      | 13.480    | 13.695 | 13.563 | 13.608 | 13.752 | 13.620 | 0.380         | 0.017           | 12.439        | 1.561        | 0.071           |
|           | 平均値 |           | 13.489    | 13.645 | 13.434 | 13.509 | 13.621 | 13.539 | 0.461         | 0.021           | 12.633        | 1.367        | 0.062           |
| 海中部       | 15  | 3.50      | 13.737    | 13.424 | 13.578 | 12.883 | 13.261 | 13.377 | 0.623         | 0.028           | 12.829        | 1.171        | 0.053           |
|           | 16  | 3.75      | 13.050    | 13.473 | 13.636 | 13.613 | 12.803 | 13.315 | 0.685         | 0.031           | 12.442        | 1.558        | 0.071           |
|           | 17  | 4.00      | 13.192    | 13.487 | 13.247 | 13.413 | 13.117 | 13.291 | 0.709         | 0.032           | 12.638        | 1.362        | 0.062           |
|           | 18  | 4.25      | 13.626    | 13.294 | 13.564 | 13.466 | 13.372 | 13.464 | 0.536         | 0.024           | 12.643        | 1.357        | 0.062           |
|           | 19  | 4.50      | 13.545    | 13.486 | 13.509 | 13.557 | 13.521 | 13.524 | 0.476         | 0.022           | 12.981        | 1.019        | 0.046           |
|           | 20  | 4.75      | 12.607    | 13.015 | 12.958 | 13.162 | 13.120 | 12.972 | 1.028         | 0.047           | 12.046        | 1.954        | 0.089           |
|           | 21  | 5.00      | 13.373    | 13.225 | 12.902 | 12.878 | 12.480 | 12.972 | 1.028         | 0.047           | 12.322        | 1.678        | 0.076           |
|           | 22  | 5.25      | 12.729    | 12.944 | 13.393 | 12.435 | 12.967 | 12.894 | 1.106         | 0.050           | 12.363        | 1.637        | 0.074           |
|           | 23  | 5.50      | 13.412    | 13.455 | 13.384 | 13.382 | 13.360 | 13.399 | 0.601         | 0.027           | 13.203        | 0.797        | 0.036           |
|           | 24  | 5.75      | 13.704    | 13.592 | 13.732 | 13.227 | 13.446 | 13.540 | 0.460         | 0.021           | 13.027        | 0.973        | 0.044           |
|           | 25  | 6.00      | 13.074    | 13.403 | 13.584 | 13.576 | 13.607 | 13.449 | 0.551         | 0.025           | 12.693        | 1.307        | 0.059           |
|           | 26  | 6.25      | 13.626    | 13.559 | 13.604 | 13.492 | 13.620 | 13.580 | 0.420         | 0.019           | 13.470        | 0.530        | 0.024           |
|           | 27  | 6.50      | 13.433    | 13.349 | 13.442 | 13.466 | 13.214 | 13.381 | 0.619         | 0.028           | 13.133        | 0.867        | 0.039           |
|           | 28  | 6.75      | 13.331    | 13.421 | 13.384 | 13.430 | 13.481 | 13.409 | 0.591         | 0.027           | 13.153        | 0.847        | 0.039           |
|           | 29  | 7.00      | 13.761    | 13.661 | 13.650 | 13.605 | 13.777 | 13.691 | 0.309         | 0.014           | 13.558        | 0.442        | 0.020           |
|           | 30  | 7.25      | 13.552    | 13.503 | 13.518 | 13.597 | 13.537 | 13.541 | 0.459         | 0.021           | 13.363        | 0.637        | 0.029           |
|           | 平均値 |           | 13.360    | 13.393 | 13.443 | 13.324 | 13.293 | 13.362 | 0.638         | 0.029           | 12.867        | 1.134        | 0.052           |
| 海土        | 31  | 7.50      | 13.399    | 13.555 | 13.385 | 13.610 | 13.529 | 13.496 | 0.504         | 0.023           | 13.368        | 0.632        | 0.029           |
|           | 32  | 7.75      | 13.479    | 13.550 | 13.489 | 13.629 | 13.565 | 13.542 | 0.458         | 0.021           | 13.473        | 0.527        | 0.024           |
|           | 33  | 8.00      | 13.564    | 13.551 | 13.544 | 13.506 | 13.433 | 13.520 | 0.480         | 0.022           | 13.413        | 0.587        | 0.027           |
|           | 34  | 8.25      | 13.617    | 13.698 | 13.716 | 13.698 | 13.701 | 13.686 | 0.314         | 0.014           | 13.573        | 0.427        | 0.019           |
|           | 平均値 |           | 13.515    | 13.589 | 13.534 | 13.611 | 13.557 | 13.561 | 0.439         | 0.020           | 13.457        | 0.543        | 0.025           |

表2.4-2 板厚測定結果(Ps9-1,陸側)

| 部位        | 番号  | 杭長<br>(m) | 板厚測定値(mm) |        |        |        |        |        | 板厚減少量<br>(mm) | 腐食速度<br>(mm/yr) | 孔食部板厚<br>(mm) | 孔食深さ<br>(mm) | 孔食速度<br>(mm/yr) |
|-----------|-----|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|
|           |     |           | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      | 平均     |               |                 |               |              |                 |
| 飛沫部       | 1   | 0.00      | 11.053    | 10.920 | 10.784 | 10.786 | 10.959 | 10.900 | 3.100         | 0.141           | 8.798         | 5.202        | 0.236           |
|           | 2   | 0.25      | 11.251    | 11.315 | 11.222 | 11.191 | 11.059 | 11.208 | 2.792         | 0.127           | 8.231         | 5.769        | 0.262           |
|           | 3   | 0.50      | 9.550     | 9.346  | 10.383 | 9.781  | 10.266 | 9.865  | 4.135         | 0.188           | 6.646         | 7.354        | 0.334           |
|           | 4   | 0.75      | 12.738    | 12.031 | 12.232 | 12.788 | 12.018 | 12.361 | 1.639         | 0.074           | 11.885        | 2.115        | 0.096           |
|           | 5   | 1.00      | 10.103    | 9.552  | 9.599  | 9.859  | 8.722  | 9.567  | 4.433         | 0.202           | 8.682         | 5.318        | 0.242           |
|           | 6   | 1.25      | 8.386     | 9.006  | 9.166  | 9.639  | 9.828  | 9.203  | 4.797         | 0.218           | 6.473         | 7.527        | 0.342           |
|           | 7   | 1.50      | 13.406    | 13.447 | 13.508 | 13.692 | 13.475 | 13.506 | 0.494         | 0.022           | 12.835        | 1.165        | 0.053           |
|           | 8   | 1.75      | 13.373    | 13.500 | 13.389 | 13.469 | 13.379 | 13.422 | 0.578         | 0.026           | 12.936        | 1.064        | 0.048           |
|           | 平均値 |           | 11.233    | 11.140 | 11.284 | 11.401 | 11.213 | 11.254 | 2.746         | 0.125           | 9.561         | 4.439        | 0.202           |
| 干満部<br>上部 | 9   | 2.00      | 13.244    | 13.360 | 13.358 | 13.389 | 13.282 | 13.327 | 0.673         | 0.031           | 13.216        | 0.784        | 0.036           |
|           | 10  | 2.25      | 13.647    | 13.661 | 13.673 | 13.610 | 13.763 | 13.671 | 0.329         | 0.015           | 13.453        | 0.547        | 0.025           |
|           | 11  | 2.50      | 13.688    | 13.614 | 13.645 | 13.546 | 13.670 | 13.633 | 0.367         | 0.017           | 13.356        | 0.644        | 0.029           |
|           | 平均値 |           | 13.526    | 13.545 | 13.559 | 13.515 | 13.572 | 13.543 | 0.457         | 0.021           | 13.342        | 0.658        | 0.030           |
| 干満部<br>下部 | 12  | 2.75      | 13.615    | 13.652 | 13.597 | 13.638 | 13.431 | 13.587 | 0.413         | 0.019           | 13.337        | 0.663        | 0.030           |
|           | 13  | 3.00      | 13.500    | 13.506 | 13.624 | 13.581 | 13.496 | 13.541 | 0.459         | 0.021           | 13.333        | 0.667        | 0.030           |
|           | 14  | 3.25      | 13.589    | 13.453 | 13.458 | 13.480 | 13.457 | 13.487 | 0.513         | 0.023           | 13.075        | 0.925        | 0.042           |
|           | 平均値 |           | 13.568    | 13.537 | 13.560 | 13.566 | 13.461 | 13.538 | 0.462         | 0.021           | 13.248        | 0.752        | 0.034           |
| 海中部       | 15  | 3.50      | 13.553    | 13.543 | 13.378 | 13.479 | 13.533 | 13.497 | 0.503         | 0.023           | 13.066        | 0.934        | 0.042           |
|           | 16  | 3.75      | 13.564    | 13.746 | 13.720 | 13.641 | 13.575 | 13.649 | 0.351         | 0.016           | 13.501        | 0.499        | 0.023           |
|           | 17  | 4.00      | 13.551    | 13.589 | 13.468 | 13.450 | 13.506 | 13.513 | 0.487         | 0.022           | 12.859        | 1.141        | 0.052           |
|           | 18  | 4.25      | 13.664    | 13.810 | 13.633 | 13.589 | 13.616 | 13.662 | 0.338         | 0.015           | 13.199        | 0.801        | 0.036           |
|           | 19  | 4.50      | 13.666    | 13.559 | 13.518 | 13.630 | 13.599 | 13.594 | 0.406         | 0.018           | 13.213        | 0.787        | 0.036           |
|           | 20  | 4.75      | 13.446    | 13.530 | 13.419 | 13.431 | 13.471 | 13.459 | 0.541         | 0.025           | 12.904        | 1.096        | 0.050           |
|           | 21  | 5.00      | 12.570    | 12.610 | 12.426 | 12.569 | 12.405 | 12.516 | 1.484         | 0.067           | 12.168        | 1.832        | 0.083           |
|           | 22  | 5.25      | 13.103    | 13.528 | 13.353 | 13.122 | 13.539 | 13.329 | 0.671         | 0.031           | 12.410        | 1.590        | 0.072           |
|           | 23  | 5.50      | 13.559    | 13.499 | 13.550 | 13.730 | 13.552 | 13.578 | 0.422         | 0.019           | 13.318        | 0.682        | 0.031           |
|           | 24  | 5.75      | 13.194    | 13.126 | 13.205 | 13.218 | 13.082 | 13.165 | 0.835         | 0.038           | 12.975        | 1.025        | 0.047           |
|           | 25  | 6.00      | 13.226    | 13.289 | 13.188 | 13.039 | 13.237 | 13.196 | 0.804         | 0.037           | 12.789        | 1.211        | 0.055           |
|           | 26  | 6.25      | 13.742    | 13.816 | 13.584 | 13.600 | 13.528 | 13.654 | 0.346         | 0.016           | 13.495        | 0.505        | 0.023           |
|           | 27  | 6.50      | 13.640    | 13.601 | 13.701 | 13.745 | 13.528 | 13.643 | 0.357         | 0.016           | 13.365        | 0.635        | 0.029           |
|           | 28  | 6.75      | 13.495    | 13.758 | 13.645 | 13.668 | 13.745 | 13.662 | 0.338         | 0.015           | 13.259        | 0.741        | 0.034           |
|           | 29  | 7.00      | 13.488    | 13.548 | 13.497 | 13.585 | 13.463 | 13.516 | 0.484         | 0.022           | 13.333        | 0.667        | 0.030           |
|           | 30  | 7.25      | 13.516    | 13.419 | 13.341 | 13.328 | 13.262 | 13.373 | 0.627         | 0.028           | 13.239        | 0.761        | 0.035           |
|           | 平均値 |           | 13.436    | 13.498 | 13.414 | 13.427 | 13.415 | 13.438 | 0.562         | 0.026           | 13.068        | 0.932        | 0.042           |
| 海土        | 31  | 7.50      | 13.472    | 13.349 | 13.563 | 13.558 | 13.560 | 13.500 | 0.500         | 0.023           | 13.326        | 0.674        | 0.031           |
|           | 32  | 7.75      | 13.743    | 13.729 | 13.769 | 13.753 | 13.791 | 13.757 | 0.243         | 0.011           | 13.724        | 0.276        | 0.013           |
|           | 33  | 8.00      | 13.756    | 13.735 | 13.725 | 13.724 | 13.730 | 13.734 | 0.266         | 0.012           | 13.478        | 0.522        | 0.024           |
|           | 34  | 8.25      | 13.702    | 13.758 | 13.743 | 13.677 | 13.645 | 13.705 | 0.295         | 0.013           | 13.630        | 0.370        | 0.017           |
|           | 平均値 |           | 13.668    | 13.643 | 13.700 | 13.678 | 13.682 | 13.674 | 0.326         | 0.015           | 13.540        | 0.461        | 0.021           |

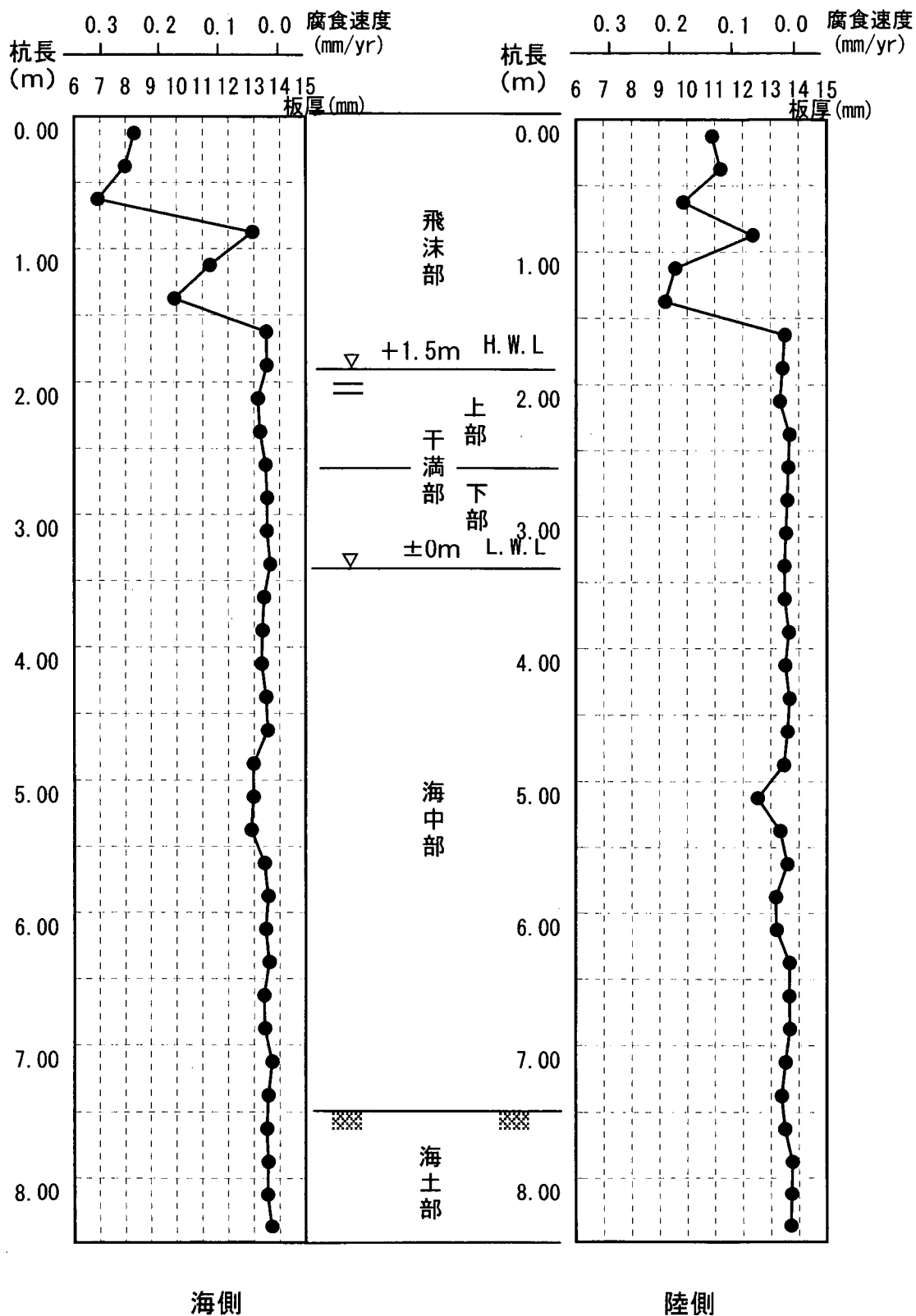


図2.4-1 無防食鋼管杭の平均板厚  
プロフィール(Ps9-1)

表 2.4-3 無防食(炭素鋼無処理)鋼管杭における環境別腐食速度および孔食速度(mm/yr)

|      |    |     | 飛沫部   | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部   | 海土部   |
|------|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 腐食速度 | 海側 | 平均値 | 0.157 | 0.033 | 0.021 | 0.029 | 0.020 |
|      |    | 最大値 | 0.322 | 0.039 | 0.023 | 0.050 | 0.023 |
|      | 陸側 | 平均値 | 0.125 | 0.021 | 0.021 | 0.026 | 0.015 |
|      |    | 最大値 | 0.218 | 0.031 | 0.023 | 0.067 | 0.023 |
| 孔食速度 | 海側 | 平均値 | 0.194 | 0.077 | 0.062 | 0.052 | 0.025 |
|      |    | 最大値 | 0.368 | 0.103 | 0.071 | 0.089 | 0.029 |
|      | 陸側 | 平均値 | 0.202 | 0.030 | 0.034 | 0.042 | 0.021 |
|      |    | 最大値 | 0.342 | 0.036 | 0.042 | 0.083 | 0.031 |

#### (4)管内面腐食

無防食杭 Ps9-1 の管内面表面は管外面に比べて平滑で腐食は少ないが若干の腐食が観察された。飛沫部位では腐食が少なく、干満部位では粗く、海底端部では腐食がほとんど起こっていない状態であった。

土中に相当する部位で、少し形態の異なる腐食が検出されたので防食杭 Ps5-2、Ps8-4' 各杭における無防食海底端部の除錆後の管内の表面と断面を比較観察した。この部位の管内面腐食はほとんど起こっていなかった。

### 4. 3 耐海水鋼(Cr-Al 系)巻き鋼管杭の調査

調査対象の Ps5-1' 杭は、JIS Z 2371 に準拠した方法にて除錆処理を行なった。調査対象杭は、上下方向に 30cm 間隔で切断し、さらに円周方向に 6 分割し試料とした。

#### (1)除錆後の耐海水鋼(Cr-Al 系)の外観

除錆後の腐食状況を調べたが、飛沫部の耐海水鋼の腐食量は大きく一部貫通孔も見られた。貫通孔の数は、陸側の方が多かった。干満部～海中部は、陸側表面の凹凸も大きかったが海側表面の凹凸は少ない。全体的に腐食の程度は飛沫部と比較すると著しく少ない。

#### (2)除錆後の炭素鋼の素地表面外観

除錆後の素地表面を調べたが、飛沫部においては被覆金属に貫通孔が見られたため、素地表面にも若干の腐食が認められる。干満部～海中部では被覆下の領域はほとんど腐食はない。一方、被覆領域直下～10cm の範囲内では、いくつかの下地鋼管の貫通孔が認められた。耐海水鋼をカソード、下地鋼管をアノードとするマクロセルが被覆下端にて形成され、異種金属接触腐食により下地鋼管が集中的に腐食したものと推測される。この下地鋼管の貫通孔の状況をスケッチにしたものを図 2.3-1(1)に示す。

#### (3)耐海水鋼(Cr-Al 系)の板厚減少量

除錆後の被覆金属の板厚測定結果および板厚減少量、腐食速度の計算結果を表 2.4-4 (海側)、表 2.4-5 (陸側)に示す。また板厚減少量(腐食速度)のプロフィールを図 2.4-2 に示す。

飛沫部においては、平均腐食速度が海側 0.149mm/yr、陸側 0.135mm/yr で、無防食鋼管杭の平均腐食速度(海側 0.157mm/yr 陸側 0.125mm/yr)と比較し、ほぼ同程度である。干満部上部でも無防食鋼管杭より若干腐食速度は大きい。一方、干満部下部～海中部においては、無防食鋼管杭と比較し腐食速度は非常に小さく、耐海水鋼の耐食性向上の効果が現れたと考えられる。

#### (4)被覆境界部の板厚測定

耐海水鋼(Cr-Al 系)を巻いた被覆下端部から以深の炭素鋼の板厚測定結果を表 2.4-6(1)～(6)に示す。

海側(10～12 系列は海側を表す)における被覆領域直下 10～40cm の範囲において、著しい肉厚の減少が見られ、陸側も 10～60cm の範囲において著しい肉厚の減少が見られた。このような素地鋼管の集中腐食は耐海水鋼と炭素鋼のガルバニック対による異種金属接触腐食が考えられるが、通常の異種金属接触腐食の範囲は被覆下端より 10cm 程度であるので、それ以上はサンドエロージョンによる影響も考えられる。

表2.4-4 耐海水鋼(Cr-Al系)の被覆金属肉厚測定結果 (Ps5-1', 海側)

| 部位  | 杭長<br>(m) | 板厚測定値 (mm) |      |      |      |      |       | 板厚減少量<br>(mm) | 腐食速度<br>(mm/yr) |
|-----|-----------|------------|------|------|------|------|-------|---------------|-----------------|
|     |           | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 平均    |               |                 |
| 飛沫部 | 0.75      | —          | —    | —    | —    | —    | —     | —             | —               |
|     | 1.00      | 2.38       | 3.64 | 3.03 | 2.79 | 2.41 | 2.850 | 3.150         | 0.143           |
|     | 1.25      | 2.70       | 2.02 | 2.68 | 2.64 | 2.86 | 2.580 | 3.420         | 0.155           |
|     | 平均值       | 2.54       | 2.83 | 2.86 | 2.72 | 2.64 | 2.715 | 3.285         | 0.149           |
| 干満部 | 2.25      | 3.89       | 5.31 | 3.82 | 4.44 | 5.05 | 4.502 | 1.498         | 0.068           |
|     | 2.50      | 4.51       | 4.96 | 4.77 | 5.66 | 5.11 | 5.002 | 0.998         | 0.045           |
|     | 2.75      | 5.91       | 5.52 | 5.59 | 5.34 | 5.52 | 5.576 | 0.424         | 0.019           |
|     | 平均值       | 4.77       | 5.26 | 4.73 | 5.15 | 5.23 | 5.027 | 0.973         | 0.044           |
| 海中部 | 3.75      | 5.98       | 5.95 | 5.95 | 5.90 | 6.07 | 5.970 | 0.030         | 0.001           |
|     | 4.00      | 6.09       | 6.09 | 6.02 | 5.88 | 6.01 | 6.018 | -0.018        | -0.001          |
|     | 4.25      | 6.12       | 6.09 | 6.15 | 6.02 | 6.08 | 6.092 | -0.092        | -0.004          |
|     | 4.50      | 6.04       | 5.93 | 5.98 | 5.92 | 6.03 | 5.980 | 0.020         | 0.001           |
|     | 4.75      | 5.92       | 6.12 | 5.91 | 6.04 | 5.94 | 5.986 | 0.014         | 0.001           |
|     | 5.00      | 5.87       | 5.85 | 5.90 | 5.77 | 6.05 | 5.888 | 0.112         | 0.005           |
|     | 5.25      | 5.74       | 5.72 | 5.78 | 5.90 | 5.81 | 5.790 | 0.210         | 0.010           |
|     | 5.50      | 5.98       | 5.98 | 6.00 | 6.03 | 5.83 | 5.964 | 0.036         | 0.002           |
|     | 5.75      | 5.96       | 5.74 | 5.92 | 5.85 | 5.96 | 5.886 | 0.114         | 0.005           |
|     | 平均值       | 5.97       | 5.94 | 5.96 | 5.92 | 5.98 | 5.953 | 0.047         | 0.002           |

表2.4-5 耐海水鋼(Cr-Al系)の被覆金属肉厚測定結果 (Ps5-1', 陸側)

| 部位  | 杭長<br>(m) | 板厚測定値 (mm) |      |      |      |      |       | 板厚減少量<br>(mm) | 腐食速度<br>(mm/yr) |
|-----|-----------|------------|------|------|------|------|-------|---------------|-----------------|
|     |           | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 平均    |               |                 |
| 飛沫部 | 0.75      | —          | —    | 1.53 | 2.74 | 3.15 | 2.473 | 3.527         | 0.160           |
|     | 1.00      | 3.28       | 2.76 | 2.21 | 3.21 | 3.72 | 3.036 | 2.964         | 0.135           |
|     | 1.25      | 3.82       | 3.20 | 3.98 | 3.75 | 3.26 | 3.602 | 2.398         | 0.109           |
|     | 平均值       | 3.55       | 2.98 | 2.57 | 3.23 | 3.38 | 3.037 | 2.963         | 0.135           |
| 干満部 | 2.25      | 3.74       | 4.81 | 4.56 | 3.92 | 2.97 | 4.000 | 2.000         | 0.091           |
|     | 2.50      | 4.95       | 5.04 | 5.20 | 4.65 | 5.49 | 5.066 | 0.934         | 0.042           |
|     | 2.75      | 5.46       | 5.83 | 5.65 | 5.44 | 5.39 | 5.554 | 0.446         | 0.020           |
|     | 平均值       | 4.72       | 5.23 | 5.14 | 4.67 | 4.62 | 4.873 | 1.127         | 0.051           |
| 海中部 | 3.75      | 6.08       | 6.14 | 6.17 | 5.97 | 6.09 | 6.090 | -0.090        | -0.004          |
|     | 4.00      | 6.12       | 6.03 | 6.24 | 6.27 | 6.04 | 6.140 | -0.140        | -0.006          |
|     | 4.25      | 6.16       | 6.18 | 6.11 | 6.03 | 6.06 | 6.108 | -0.108        | -0.005          |
|     | 4.50      | 6.08       | 6.04 | 6.09 | 6.16 | 6.12 | 6.098 | -0.098        | -0.004          |
|     | 4.75      | 5.95       | 6.06 | 6.18 | 6.04 | 6.20 | 6.086 | -0.086        | -0.004          |
|     | 5.00      | 6.01       | 6.12 | 5.87 | 5.98 | 6.02 | 6.000 | 0.000         | 0.000           |
|     | 5.25      | 5.92       | 5.97 | 5.89 | 6.18 | 6.07 | 6.006 | -0.006        | 0.000           |
|     | 5.50      | 5.76       | 5.63 | 5.85 | 5.93 | 5.65 | 5.764 | 0.236         | 0.011           |
|     | 5.75      | 6.06       | 5.80 | 5.95 | 6.04 | 5.55 | 5.880 | 0.120         | 0.005           |
|     | 平均值       | 6.02       | 6.00 | 6.04 | 6.07 | 5.98 | 6.019 | -0.019        | -0.001          |

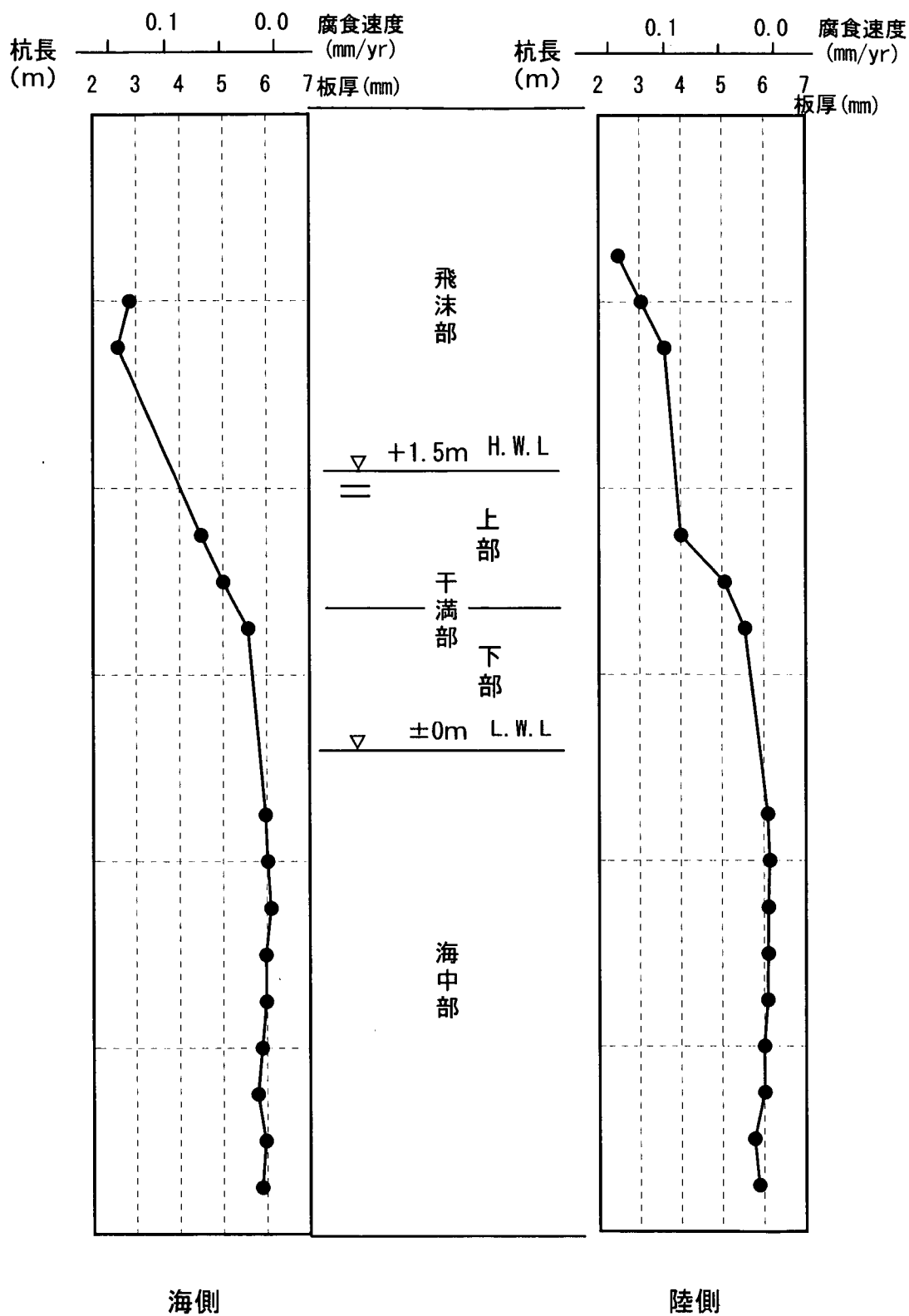


図2.4-2 耐海水鋼(Cr-Al系)の被覆金属の平均板厚プロフィール(Ps5-1')

表 2.4-6(1) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (海側)

| 12series   |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 7.65  | 7.28  | 4.59  | 3.85  | 0     | 4.67   |
| 2.8        | 5.15  | 0     | 3.84  | 10.50 | 4.33  | 4.76   |
| 2.9        | 13.12 | 7.68  | 10.72 | 13.16 | 9.35  | 10.81  |
| 3.0        | 13.10 | 10.94 | 12.95 | 13.29 | 12.35 | 12.53  |
| 3.1        | 13.30 | 13.00 | 13.04 | 13.10 | 12.97 | 13.08  |
| 3.2        | 13.63 | 13.48 | 13.24 | 13.53 | 13.28 | 13.43  |
| 3.3        | 12.67 | 12.49 | 12.52 | 12.22 | 11.95 | 12.37  |

表 2.4-6(2) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (海側)

| 11series   |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 7.39  | 10.97 | 10.67 | 8.73  | 12.02 | 9.96   |
| 2.8        | 11.04 | 12.82 | 12.69 | 12.00 | 12.93 | 12.30  |
| 2.9        | 13.48 | 13.35 | 13.51 | 12.99 | 12.94 | 13.25  |
| 3.0        | 13.08 | 12.83 | 13.15 | 12.70 | 12.95 | 12.94  |
| 3.1        | 12.51 | 12.64 | 12.26 | 12.02 | 12.37 | 12.36  |
| 3.2        | 12.17 | 12.30 | 12.35 | 12.44 | 12.43 | 12.34  |
| 3.3        | 12.90 | 12.12 | 12.20 | 12.63 | 12.91 | 12.55  |

表 2.4-6(3) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (海側)

| 10series   |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 2.05  | 2.86  | 2.01  | 2.43  | 2.24  | 2.32   |
| 2.8        | 3.25  | 1.70  | 3.09  | 3.69  | 2.61  | 2.87   |
| 2.9        | 3.40  | 5.49  | 2.78  | 2.93  | 7.65  | 4.45   |
| 3.0        | 4.84  | 9.57  | 10.00 | 9.54  | 10.02 | 8.79   |
| 3.1        | 10.87 | 11.85 | 11.61 | 12.58 | 12.06 | 11.79  |
| 3.2        | 11.95 | 12.16 | 12.53 | 12.10 | 12.71 | 12.29  |
| 3.3        | 11.99 | 11.88 | 12.44 | 12.98 | 12.93 | 12.44  |

表 2.4-6(4) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (陸側)

| 3series    |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 1.82  | 1.49  | 1.39  | 3.04  | 1.95  | 1.94   |
| 2.8        | 3.46  | 3.74  | 3.63  | 4.22  | 4.61  | 3.93   |
| 2.9        | 5.00  | 6.20  | 4.07  | 4.25  | 3.58  | 4.62   |
| 3.0        | 4.98  | 4.81  | 5.08  | 4.33  | 4.46  | 4.73   |
| 3.1        | 5.53  | 9.26  | 9.74  | 8.96  | 8.80  | 8.46   |
| 3.2        | 10.98 | 10.86 | 10.95 | 12.18 | 10.99 | 11.19  |
| 3.3        | 11.20 | 12.06 | 11.60 | 12.20 | 12.37 | 11.89  |

表 2.4-6(5) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (陸側)

| 2series    |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 3.50  | 3.44  | 2.91  | 3.49  | 2.92  | 3.25   |
| 2.8        | 3.54  | 3.34  | 3.38  | 2.96  | 3.15  | 3.27   |
| 2.9        | 3.11  | 5.23  | 4.07  | 4.50  | 4.73  | 4.33   |
| 3.0        | 5.47  | 5.30  | 5.06  | 6.28  | 5.31  | 5.48   |
| 3.1        | 5.92  | 5.90  | 5.65  | 5.73  | 5.56  | 5.75   |
| 3.2        | 6.04  | 8.03  | 6.96  | 8.53  | 10.71 | 8.05   |
| 3.3        | 12.55 | 10.72 | 11.85 | 12.94 | 11.01 | 11.81  |

表 2.4-6(6) 被覆境界部炭素鋼の肉厚測定結果 (陸側)

| 1series    |       |       |       |       |       |        |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 境界からの距離(m) | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 平均(mm) |
| T.P. -2.7  | 1.90  | 2.24  | 1.62  | 2.78  | 1.07  | 1.92   |
| 2.8        | 3.35  | 1.64  | 3.00  | 3.99  | 3.24  | 3.04   |
| 2.9        | 3.64  | 3.48  | 4.42  | 5.51  | 7.71  | 4.95   |
| 3.0        | 4.19  | 5.75  | 4.03  | 5.29  | 4.94  | 4.84   |
| 3.1        | 12.83 | 12.50 | 12.98 | 12.09 | 13.15 | 12.71  |
| 3.2        | 13.08 | 12.67 | 12.96 | 12.09 | 12.59 | 12.68  |
| 3.3        | 12.86 | 11.85 | 12.84 | 12.40 | 12.98 | 12.59  |

## (5) 耐海水鋼(Cr-Al 系) 巻き鋼管杭の貫通孔測定

耐海水鋼(Cr-Al 系) 巻き鋼管杭の貫通孔測定結果を表 2.4-7 に示す。

貫通孔は上端からの距離が0～1.5mの飛沫部領域に主に発生し、個数、サイズともに陸側の方が多かった。飛沫部の平均腐食速度では陸側の方が小さいにも関わらず貫通孔の数が陸側の方が多く、陸側の方が集中腐食を受けやすい状況にあったと考えられる。

表 2. 4-7 耐海水鋼(Cr-Al 系) 巻き鋼管杭の貫通孔数測定結果

|     | 杭頭からの距離(m)     | 海側                                |    | 陸側                                                         |    |
|-----|----------------|-----------------------------------|----|------------------------------------------------------------|----|
|     |                | サイズ(mm)                           | 個数 | サイズ(mm)                                                    | 個数 |
| 飛沫部 | 0~0.25         | 20×70、20×25、35×7、7×8              | 4  | 10×15、20×15、8×10、15×10<br>10×15、30×15、10×15、<br>8×15、20×30 | 9  |
|     | 0.25 ~<br>0.50 | 15×30、8×8、30×20、60×35<br>6×6      | 5  | 18×50、25×18、40×50、55×20<br>18×55、10×10                     | 6  |
|     | 0.50 ~<br>0.75 | 15×70                             | 1  | 35×60、25×25、120×70<br>10×25、25×30、30×35、2×2                | 7  |
|     | 0.75 ~<br>1.00 | 10×20                             | 1  | 10×10、30×25、40×40、30×25<br>80×50、40×10、50×60               | 7  |
|     | 1.00 ~<br>1.25 | 10×12、25×6、10×40、10×50<br>2×5、7×4 | 6  | 25×50、13×15、30×50、5×5<br>20×10、10×20、25×12                 | 7  |
|     | 1.25 ~<br>1.50 | 13×18、12×44、15×11                 | 3  | 30×35、20×15、15×15、15×10<br>18×18、2×2、6×2、15×7、<br>70×25    | 9  |
|     | 1.50 ~<br>1.75 |                                   | 0  | 25×45                                                      | 1  |
|     | 1.75 ~<br>2.00 |                                   | 0  |                                                            | 0  |
| 干満部 | 2.00 ~<br>2.25 |                                   | 0  | 6×30 (溶接部)                                                 | 1  |

#### 4. 4 塗覆装鋼管杭の調査

無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3回) 鋼管杭(Ps5-2 および Ps7-2' 杭)、無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3回) + ガラスクロス鋼管杭(Ps6-4 および 8-4' 杭)の各種調査測定結果を以下に示す。

##### (1) 電気抵抗

図 2.2-2 に示した定位置 4 箇所、10 $\times$ 10cm アルミ箔を各部位に貼り付け、1kHz で塗膜の電気抵抗を測定した結果を表 2.4-8 に示す。抵抗値として 100cm<sup>2</sup> 当たりの抵抗値 ( $\Omega$ ) と単位当たりの抵抗に換算した値 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) を示した。

(a) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) 鋼管杭  
(Ps5-2、Ps7-2')

塗膜抵抗は各部位の差はなく、比較的高い値 8.4 $\sim$ 11.5 $\times 10^6 \Omega$  (8.4 $\sim$ 11.5 $\times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) を保持していた。

(b) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) + ガラスクロス鋼管杭  
(Ps6-4、Ps8-4')

塗膜抵抗はタールエポキシ塗装に比べて低くなっており、各部位の差はなく、比較的低い値 1.0 $\sim$ 4.4 $\times 10^4 \Omega$  (1.0 $\sim$ 4.4 $\times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) を保持していた。

表 2.4-8 塗膜電気抵抗測定結果 (1kHz)

| 杭 No. | 測定部位 | 曝露環境  | 抵抗値 ( $\Omega$ )   | 抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) |
|-------|------|-------|--------------------|-----------------------------------|
| 5-2   | ①    | 飛沫部   | $9.5 \times 10^6$  | $9.5 \times 10^8$                 |
|       | ②    | 干満部上部 | $9.4 \times 10^6$  | $9.4 \times 10^8$                 |
|       | ③    | 干満部下部 | $11.4 \times 10^6$ | $11.4 \times 10^8$                |
|       | ④    | 海中部   | $11.5 \times 10^6$ | $11.5 \times 10^8$                |
| 7-2'  | ①    | 飛沫部   | $10.2 \times 10^6$ | $10.2 \times 10^8$                |
|       | ②    | 干満部上部 | $10.2 \times 10^6$ | $10.2 \times 10^8$                |
|       | ③    | 干満部下部 | $11.2 \times 10^6$ | $11.2 \times 10^8$                |
|       | ④    | 海中部   | $8.4 \times 10^6$  | $8.4 \times 10^8$                 |
| 6-4   | ①    | 飛沫部   | $2.3 \times 10^4$  | $10.2 \times 10^6$                |
|       | ②    | 干満部上部 | $1.5 \times 10^4$  | $1.5 \times 10^6$                 |
|       | ③    | 干満部下部 | $1.5 \times 10^4$  | $1.5 \times 10^6$                 |
|       | ④    | 海中部   | $1.0 \times 10^4$  | $1.0 \times 10^6$                 |
| 8-4'  | ①    | 飛沫部   | $1.1 \times 10^4$  | $1.1 \times 10^6$                 |
|       | ②    | 干満部上部 | $4.4 \times 10^4$  | $4.4 \times 10^6$                 |
|       | ③    | 干満部下部 | $3.1 \times 10^4$  | $3.1 \times 10^6$                 |
|       | ④    | 海中部   | $2.6 \times 10^4$  | $2.6 \times 10^6$                 |

## (2) 膜厚

塗覆装鋼管杭の図 2. 2-2 に示した曝露各部位 4 箇所より採取した小試験体について膜厚を測定し、その結果を表 2. 4-9(1)～(2)に示す。

Ps5-2 杭で 800～1300  $\mu\text{m}$ 、Ps7-2' 杭で 1100～1400  $\mu\text{m}$  であった。Ps6-4 杭および 8-4' 杭ともに膜厚は 1000～1400  $\mu\text{m}$  程度であった。(曝露前の初期値 1040～1100  $\mu\text{m}$ )

表2. 4-9(1) 無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭の膜厚

| Ps5-2 | 膜 厚 ( $\mu\text{m}$ ) |      |      |      |      | Ps7-2' | 膜 厚 ( $\mu\text{m}$ ) |      |      |      |      |
|-------|-----------------------|------|------|------|------|--------|-----------------------|------|------|------|------|
|       | 1                     | 2    | 3    | 4    | 平均   |        | 1                     | 2    | 3    | 4    | 平均   |
| U1    | 830                   | 802  | 858  | 828  | 830  | U1     | 1146                  | 1212 | 1142 | 1102 | 1151 |
| U2    | 862                   | 878  | 1056 | 1102 | 975  | U2     | 傷発生面積が50%程度有り測定できず    |      |      |      |      |
| U3    | 890                   | 834  | 1224 | 1004 | 988  | U3     | 1384                  | 1358 | 1504 | 1400 | 1412 |
| U4    | 1180                  | 1208 | 1280 | 1142 | 1203 | U4     | 1252                  | 1422 | 1458 | 1528 | 1415 |
| R1    | 898                   | 984  | 968  | 918  | 942  | R1     | 1404                  | 1334 | 1222 | 1244 | 1301 |
| R2    | 1382                  | 1280 | 1214 | 1238 | 1279 | R2     | 1090                  | 1122 | 1126 | 1058 | 1099 |
| R3    | 1292                  | 1334 | 1322 | 1226 | 1294 | R3     | 1156                  | 1052 | 1288 | 1350 | 1212 |
| R4    | 1110                  | 1186 | 1176 | 1124 | 1149 | R4     | 1256                  | 1268 | 1342 | 1298 | 1291 |

(U：海側、R：陸側を示す)

表2. 4-9(2) 無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭の膜厚

| Ps6-4 | 膜 厚 ( $\mu\text{m}$ ) |      |      |      |      | Ps8-4' | 膜 厚 ( $\mu\text{m}$ ) |      |      |      |      |
|-------|-----------------------|------|------|------|------|--------|-----------------------|------|------|------|------|
|       | 1                     | 2    | 3    | 4    | 平均   |        | 1                     | 2    | 3    | 4    | 平均   |
| U1    | 698                   | 980  | 1028 | 1244 | 988  | U1     | 1208                  | 1110 | 1080 | 1145 | 1136 |
| U2    | 1148                  | 1066 | 836  | 1052 | 1026 | U2     | 1218                  | 1306 | 1280 | 1228 | 1258 |
| U3    | 1308                  | 1138 | 1108 | 1298 | 1213 | U3     | 1388                  | 1504 | 1480 | 1488 | 1465 |
| U4    | 1250                  | 1236 | 1232 | 1128 | 1212 | U4     | 1170                  | 1240 | 1184 | 1110 | 1176 |
| R1    | 1278                  | 1156 | 1082 | 1146 | 1166 | R1     | 1352                  | 1458 | 1360 | 1272 | 1361 |
| R2    | 1042                  | 1204 | 1174 | 1222 | 1161 | R2     | 1294                  | 1404 | 1414 | 1512 | 1406 |
| R3    | 1326                  | 1348 | 1206 | 1378 | 1315 | R3     | 1080                  | 1224 | 1364 | 1214 | 1221 |
| R4    | 1212                  | 1070 | 1290 | 1190 | 1191 | R4     | 1120                  | 1164 | 1020 | 1130 | 1109 |

(U：海側、R：陸側を示す)

### (3) 鉛筆硬度

塗覆装鋼管杭の図 2.2-2 に示した曝露各部位 4 箇所より採取した小試験体について鉛筆硬度を測定し、その結果を表 2.4-10 に示す。

Ps5-2 杭と Ps7-2' 杭の鉛筆硬度は H で通常の塗膜が HB 程度である事を考えると、硬くなっている傾向が認められた。また、Ps6-4 杭と 8-4' 杭も鉛筆硬度は H で硬くなっている傾向が認められた。

表 2.4-10 各杭における鉛筆硬度測定結果

| 測定部位 | 各杭の鉛筆硬度 |        |       |        |
|------|---------|--------|-------|--------|
|      | Ps5-2   | Ps7-2' | Ps6-4 | Ps8-4' |
| U 1  | H       | H      | H     | H      |
| U 2  | H       | —      | H     | H      |
| U 3  | H       | H      | H     | H      |
| U 4  | H       | H      | H     | H      |
| R 1  | H       | H      | H     | H      |
| R 2  | H       | H      | H     | H      |
| R 3  | H       | H      | H     | H      |
| R 4  | H       | H      | H     | H      |

(U：海側、R：陸側)

### (4) ピンホール

各調査杭を図 2.2-2 に示す方法により測定した。

(a) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) 鋼管杭

(Ps5-2、Ps7-2')

塗膜のひび割れ、さび発生部でピンホールが測定された。海側で 9 カ所、陸側で 42 カ所と、陸側が海側よりやや多かった。また、飛沫部から海中部にかけて、ほぼ全面にピンホールが認められた。

(b) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m) + エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3) + ガラスクロス鋼管杭

(Ps6-4、Ps8-4')

飛沫部下部や干満部を中心として海側で 3～8 カ所、陸側で 1～8 カ所のピンホールが測定されたが、タールエポキシ塗装より少なかった。これは、ガラスクロスの補強効果が認められたと考えられる。

(5) インピーダンス

各調査杭の所定位置でのインピーダンス測定結果を表 2.4-11 に示す。

無機ジंकリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭(Ps5-2 および Ps7-2' 杭)は、両杭ともインピーダンスは健全な値を維持していた。また、部位別に顕著な差は認められなかった。

無機ジंकリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭(Ps6-4 および 8-4' 杭)は、両杭ともにヤールエポキシ樹脂塗料のインピーダンスと比べて、抵抗が1桁低下している傾向が認められたが、健全なレベルであると判断される。

表2.4-11 塗覆装鋼管杭のインピーダンス測定結果

| 杭No. | 測定部位 | 0.2kHz                    |                       |                       | 0.5kHz            |                       |                       | 1.0kHz            |                       |                       |
|------|------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
|      |      | $\Omega$                  | F                     | $\tan \delta$         | $\Omega$          | F                     | $\tan \delta$         | $\Omega$          | F                     | $\tan \delta$         |
| 5-2  | U1   | $5.3 \times 10^6$         | $1.9 \times 10^{-7}$  | $7.9 \times 10^{-4}$  | $4.4 \times 10^6$ | $4.6 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$  | $6.3 \times 10^6$ | $7.1 \times 10^{-10}$ | $3.6 \times 10^{-2}$  |
|      | U2   | 発錆率が30%程度有り、インピーダンスの測定不可能 |                       |                       |                   |                       |                       |                   |                       |                       |
|      | U3   | 発錆率が30%程度有り、インピーダンスの測定不可能 |                       |                       |                   |                       |                       |                   |                       |                       |
|      | U4   | $7.0 \times 10^6$         | $6.0 \times 10^{-10}$ | $1.9 \times 10^{-1}$  | $5.9 \times 10^6$ | $5.7 \times 10^{-10}$ | $2.4 \times 10^{-1}$  | $8.1 \times 10^6$ | $5.4 \times 10^{-10}$ | $1.8 \times 10^{-1}$  |
|      | R1   | $3.3 \times 10^6$         | $6.8 \times 10^{-10}$ | $3.6 \times 10^{-1}$  | $2.0 \times 10^6$ | $7.0 \times 10^{-10}$ | $5.7 \times 10^{-1}$  | $8.4 \times 10^6$ | $6.7 \times 10^{-10}$ | $1.4 \times 10^{-1}$  |
|      | R2   | 発錆率が30%程度有り、インピーダンスの測定不可能 |                       |                       |                   |                       |                       |                   |                       |                       |
|      | R3   | $6.1 \times 10^6$         | $6.6 \times 10^{-7}$  | $2.0 \times 10^{-4}$  | $5.0 \times 10^6$ | $6.1 \times 10^{-10}$ | $2.6 \times 10^{-1}$  | $7.1 \times 10^6$ | $5.7 \times 10^{-10}$ | $2.0 \times 10^{-1}$  |
|      | R4   | $4.9 \times 10^6$         | $5.7 \times 10^{-10}$ | $2.9 \times 10^{-1}$  | $1.8 \times 10^6$ | $4.4 \times 10^{-10}$ | $10.0 \times 10^{-1}$ | $6.7 \times 10^5$ | $2.5 \times 10^{-10}$ | $4.8 \times 10^{-1}$  |
| 7-2' | U1   | $6.2 \times 10^6$         | $6.4 \times 10^{-10}$ | $2.0 \times 10^{-1}$  | $5.1 \times 10^6$ | $6.0 \times 10^{-10}$ | $1.0 \times 10^{-1}$  | $7.3 \times 10^6$ | $5.6 \times 10^{-10}$ | $3.9 \times 10^{-2}$  |
|      | U2   | 発錆率が50%程度有り、インピーダンスの測定不可能 |                       |                       |                   |                       |                       |                   |                       |                       |
|      | U3   | $4.4 \times 10^6$         | $2.1 \times 10^{-10}$ | $8.6 \times 10^{-1}$  | $2.3 \times 10^6$ | $3.8 \times 10^{-10}$ | $9.1 \times 10^{-1}$  | $5.3 \times 10^6$ | $6.4 \times 10^{-10}$ | $2.3 \times 10^{-1}$  |
|      | U4   | $7.3 \times 10^6$         | $3.2 \times 10^{-10}$ | $3.4 \times 10^{-1}$  | $5.3 \times 10^6$ | $5.7 \times 10^{-10}$ | $2.6 \times 10^{-1}$  | $8.0 \times 10^6$ | $5.4 \times 10^{-10}$ | $1.8 \times 10^{-1}$  |
|      | R1   | $2.3 \times 10^6$         | $5.8 \times 10^{-10}$ | $6.0 \times 10^{-1}$  | $1.5 \times 10^6$ | $6.3 \times 10^{-10}$ | $3.4 \times 10^{-1}$  | $7.4 \times 10^6$ | $5.0 \times 10^{-10}$ | $4.3 \times 10^{-2}$  |
|      | R2   | $3.2 \times 10^6$         | $2.0 \times 10^{-10}$ | $12.0 \times 10^{-1}$ | $1.5 \times 10^6$ | $4.8 \times 10^{-10}$ | $11.0 \times 10^{-1}$ | $6.3 \times 10^6$ | $5.4 \times 10^{-10}$ | $2.3 \times 10^{-1}$  |
|      | R3   | 発錆率が30%程度有り、インピーダンスの測定不可能 |                       |                       |                   |                       |                       |                   |                       | $5.7 \times 10^{-10}$ |
|      | R4   | $4.3 \times 10^6$         | $5.2 \times 10^{-10}$ | $3.6 \times 10^{-1}$  | $3.8 \times 10^6$ | $1.3 \times 10^{-10}$ | $16.0 \times 10^{-1}$ | $6.0 \times 10^5$ | $2.0 \times 10^{-10}$ | $6.6 \times 10^{-1}$  |
| 6-4  | U1   | $2.6 \times 10^5$         | $5.3 \times 10^{-9}$  | $5.8 \times 10^{-1}$  | $1.1 \times 10^5$ | $4.4 \times 10^{-9}$  | $6.6 \times 10^{-1}$  | $8.1 \times 10^4$ | $3.6 \times 10^{-9}$  | $5.5 \times 10^{-1}$  |
|      | U2   | $3.2 \times 10^5$         | $4.3 \times 10^{-9}$  | $5.8 \times 10^{-1}$  | $3.5 \times 10^5$ | $2.6 \times 10^{-9}$  | $8.7 \times 10^{-1}$  | $1.2 \times 10^5$ | $2.2 \times 10^{-9}$  | $30.0 \times 10^{-1}$ |
|      | U3   | $4.0 \times 10^5$         | $2.3 \times 10^{-9}$  | $8.7 \times 10^{-1}$  | $2.1 \times 10^5$ | $3.5 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $3.3 \times 10^5$ | $3.4 \times 10^{-9}$  | $7.1 \times 10^{-1}$  |
|      | U4   | $1.0 \times 10^5$         | $6.0 \times 10^{-9}$  | $13.0 \times 10^{-1}$ | $1.9 \times 10^5$ | $5.2 \times 10^{-9}$  | $8.1 \times 10^{-1}$  | $1.1 \times 10^5$ | $1.9 \times 10^{-9}$  | $38.0 \times 10^{-1}$ |
|      | R1   | $3.6 \times 10^5$         | $4.6 \times 10^{-9}$  | $4.8 \times 10^{-1}$  | $4.3 \times 10^5$ | $4.3 \times 10^{-9}$  | $1.7 \times 10^{-1}$  | $7.6 \times 10^4$ | $2.4 \times 10^{-9}$  | $8.7 \times 10^{-1}$  |
|      | R2   | $6.2 \times 10^5$         | $3.9 \times 10^{-9}$  | $3.3 \times 10^{-1}$  | $7.6 \times 10^5$ | $4.5 \times 10^{-9}$  | $2.3 \times 10^{-1}$  | $3.4 \times 10^5$ | $1.8 \times 10^{-9}$  | $13.0 \times 10^{-1}$ |
|      | R3   | $3.6 \times 10^5$         | $4.3 \times 10^{-9}$  | $5.1 \times 10^{-1}$  | $3.2 \times 10^5$ | $5.2 \times 10^{-9}$  | $4.8 \times 10^{-1}$  | $3.1 \times 10^5$ | $4.3 \times 10^{-9}$  | $6.0 \times 10^{-1}$  |
|      | R4   | $4.3 \times 10^5$         | $2.3 \times 10^{-9}$  | $8.1 \times 10^{-1}$  | $2.2 \times 10^5$ | $3.2 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $4.1 \times 10^5$ | $2.5 \times 10^{-9}$  | $7.8 \times 10^{-1}$  |
| 8-4' | U1   | $2.6 \times 10^5$         | $6.7 \times 10^{-9}$  | $4.6 \times 10^{-1}$  | $1.7 \times 10^5$ | $5.3 \times 10^{-9}$  | $3.5 \times 10^{-1}$  | $1.3 \times 10^5$ | $4.2 \times 10^{-9}$  | $2.9 \times 10^{-1}$  |
|      | U2   | $4.0 \times 10^5$         | $3.2 \times 10^{-9}$  | $6.2 \times 10^{-1}$  | $2.9 \times 10^5$ | $2.4 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $2.5 \times 10^5$ | $1.9 \times 10^{-9}$  | $17.0 \times 10^{-1}$ |
|      | U3   | $4.2 \times 10^5$         | $3.0 \times 10^{-9}$  | $6.3 \times 10^{-1}$  | $2.9 \times 10^5$ | $2.1 \times 10^{-9}$  | $13.0 \times 10^{-1}$ | $2.5 \times 10^5$ | $1.6 \times 10^{-9}$  | $20.0 \times 10^{-1}$ |
|      | U4   | $3.0 \times 10^5$         | $4.5 \times 10^{-9}$  | $5.9 \times 10^{-1}$  | $2.1 \times 10^5$ | $3.4 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $1.7 \times 10^5$ | $2.6 \times 10^{-9}$  | $18.0 \times 10^{-1}$ |
|      | R1   | $4.8 \times 10^5$         | $3.3 \times 10^{-9}$  | $5.0 \times 10^{-1}$  | $3.2 \times 10^5$ | $2.6 \times 10^{-9}$  | $3.8 \times 10^{-1}$  | $2.8 \times 10^5$ | $2.3 \times 10^{-9}$  | $2.5 \times 10^{-1}$  |
|      | R2   | $4.2 \times 10^5$         | $3.9 \times 10^{-9}$  | $4.9 \times 10^{-1}$  | $2.6 \times 10^5$ | $2.5 \times 10^{-9}$  | $12.0 \times 10^{-1}$ | $2.4 \times 10^5$ | $1.8 \times 10^{-9}$  | $18.0 \times 10^{-1}$ |
|      | R3   | $4.6 \times 10^5$         | $3.3 \times 10^{-9}$  | $5.2 \times 10^{-1}$  | $3.2 \times 10^5$ | $2.2 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $3.1 \times 10^5$ | $3.3 \times 10^{-9}$  | $7.8 \times 10^{-1}$  |
|      | R4   | $3.5 \times 10^5$         | $4.3 \times 10^{-9}$  | $5.3 \times 10^{-1}$  | $2.2 \times 10^5$ | $2.2 \times 10^{-9}$  | $11.0 \times 10^{-1}$ | $2.1 \times 10^5$ | $2.8 \times 10^{-9}$  | $14.0 \times 10^{-1}$ |

(U：海側、R：陸側を示す)

# (6) 体積固有抵抗

各調査杭の所定位置での体積固有抵抗測定結果を表 2.4-12 に示す。

無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭(Ps5-2 および Ps7-2' 杭)は、両杭とも体積固有抵抗は高いレベルを維持しており健全であると判断される。

また、無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭(Ps6-4 および 8-4'杭)は、両杭ともにタールエポキシ樹脂塗料と同様に体積固有抵抗は  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  以上を維持している。通常は  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  以上で、塗膜のバリア特性は十分と言われており、健全であると判断される。

表2.4-12 塗覆装鋼管杭の体積固有抵抗測定結果

| 測定<br>部位 | 体積固有抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) |                      |                   |                   |
|----------|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
|          | Ps5-2杭                              | Ps7-2' 杭             | Ps6-4杭            | Ps8-4' 杭          |
| U1       | $2.1 \times 10^{14}$                | $3.3 \times 10^{14}$ | $4.1 \times 10^9$ | $1.3 \times 10^9$ |
| U2       | 発錆のため測定不能                           | 発錆のため測定不能            | $3.5 \times 10^9$ | $2.4 \times 10^9$ |
| U3       | 発錆のため測定不能                           | $2.2 \times 10^{14}$ | $4.3 \times 10^9$ | $3.8 \times 10^9$ |
| U4       | $3.4 \times 10^{14}$                | $4.3 \times 10^{14}$ | $6.2 \times 10^9$ | $6.4 \times 10^9$ |
| R1       | $4.5 \times 10^{14}$                | $4.2 \times 10^{14}$ | $5.3 \times 10^9$ | $5.1 \times 10^9$ |
| R2       | 発錆のため測定不能                           | $3.3 \times 10^{14}$ | $3.2 \times 10^9$ | $3.2 \times 10^9$ |
| R3       | $2.5 \times 10^{14}$                | 発錆のため測定不能            | $3.4 \times 10^9$ | $2.8 \times 10^9$ |
| R4       | $1.7 \times 10^{14}$                | $2.4 \times 10^{14}$ | $4.4 \times 10^9$ | $1.5 \times 10^9$ |

(U：海側、R：陸側を示す)

# (7) 付着力

アドヒージョンテスター(プルオフ法)(最大( $7 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )、図 2.2-3 参照)を用い、図 2.2-2 に示した鋼管位置で各 3 点付着力(1 次)を測定した結果を表 2.4-13(1)～(2)に示す。

## (a) 無機ジンクリッチペイント( $75 \mu\text{m}$ ) + タールエポキシ樹脂塗料( $300 \mu\text{m} \times 3$ )鋼管杭

(Ps5-2、Ps7-2')

タールエポキシ塗料表層からはく離したが、付着力は各部位で大きな違いはなく、( $2 \sim 3 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )で比較的高い値で保持されていた。(表 2.4-13(1))

## (b) 無機ジンクリッチペイント( $75 \mu\text{m}$ ) + エポキシ樹脂塗料( $300 \mu\text{m} \times 3$ ) + ガラスクロス鋼管杭

(Ps6-4、Ps8-4')

付着力はタールエポキシ樹脂塗料に比べて低くなっており ( $0.5 \sim 1 \times 10^6 \text{N/m}^2$ )、ガラスクロスとの層間にはく離がおこり、エポキシ樹脂塗料とガラスクロスとの付着力が低下している。飛沫部、干満部上部では素地はく離も生じている。(表 2.4-13(2))

表2.4-13(1) Ps5-2およびPs7-2' 杭の実管での付着力測定結果

| 5-2杭<br>測定点 |    | 付着強度<br>( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 剥離箇所         | 7-2' 杭<br>測定点 |    | 付着強度<br>( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 剥離箇所         |
|-------------|----|----------------------------------------|--------------|---------------|----|----------------------------------------|--------------|
| ①           | 1  | 2.5                                    | タールエポ表層からの剥離 | ①             | 1  | 2.5                                    | タールエポ表層からの剥離 |
|             | 2  | 2.5                                    | 同上           |               | 2  | 2.2                                    | 同上           |
|             | 3  | 3.0                                    | 同上           |               | 3  | 2.4                                    | 同上           |
|             | 平均 | 2.7                                    |              |               | 平均 | 2.4                                    |              |
| ②           | 1  | 2.5                                    | タールエポ表層からの剥離 | ②             | 1  | 2.7                                    | タールエポ表層からの剥離 |
|             | 2  | 2.5                                    | 同上           |               | 2  | 2.0                                    | 同上           |
|             | 3  | 2.5                                    | 同上           |               | 3  | 2.0                                    | 同上           |
|             | 平均 | 2.5                                    |              |               | 平均 | 2.2                                    |              |
| ③           | 1  | 3.0                                    | タールエポ表層からの剥離 | ③             | 1  | 2.5                                    | タールエポ表層からの剥離 |
|             | 2  | 2.6                                    | 同上           |               | 2  | 2.6                                    | 同上           |
|             | 3  | 2.5                                    | 同上           |               | 3  | 2.0                                    | 同上           |
|             | 平均 | 2.7                                    |              |               | 平均 | 2.4                                    |              |
| ④           | 1  | 2.5                                    | タールエポ表層からの剥離 | ④             | 1  | 2.0                                    | タールエポ表層からの剥離 |
|             | 2  | 2.5                                    | 同上           |               | 2  | 2.0                                    | 同上           |
|             | 3  | 2.0                                    | 同上           |               | 3  | 2.0                                    | 同上           |
|             | 平均 | 2.3                                    |              |               | 平均 | 2.0                                    |              |

表2.4-13(2) Ps6-4およびPs8-4' 杭の実管での付着力測定結果

| 6-4杭<br>測定点 |    | 付着強度<br>( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 剥離箇所              | 8-4' 杭<br>測定点 |    | 付着強度<br>( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 剥離箇所           |
|-------------|----|----------------------------------------|-------------------|---------------|----|----------------------------------------|----------------|
| ①           | 1  | 0.5                                    | エポキシ/クロス層間60、素地40 | ①             | 1  | 1.0                                    | エポキシ下塗り凝集破壊    |
|             | 2  | 0.5                                    | 素地100%            |               | 2  | 0.5                                    | 同上             |
|             | 3  | 0.8                                    | エポキシ/クロス層間100%    |               | 3  | 0.5                                    | 同上             |
|             | 平均 | 0.6                                    |                   |               | 平均 | 0.7                                    |                |
| ②           | 1  | 0.8                                    | エポキシ/クロス層間80、素地20 | ②             | 1  | 0.5                                    | エポキシ/クロス層間100% |
|             | 2  | 1.0                                    | エポキシ/クロス層間100%    |               | 2  | 1.0                                    | 同上             |
|             | 3  | 1.0                                    | 同上                |               | 3  | 1.0                                    | 同上             |
|             | 平均 | 0.9                                    |                   |               | 平均 | 0.8                                    |                |
| ③           | 1  | 1.0                                    | エポキシ/クロス層間100%    | ③             | 1  | 1.0                                    | エポキシ/クロス層間100% |
|             | 2  | 0.5                                    | 同上                |               | 2  | 0.8                                    | 同上             |
|             | 3  | 0.8                                    | 同上                |               | 3  | 0.5                                    | 同上             |
|             | 平均 | 0.8                                    |                   |               | 平均 | 0.8                                    |                |
| ④           | 1  | 0.8                                    | エポキシ/クロス層間100%    | ④             | 1  | 1.0                                    | エポキシ/クロス層間100% |
|             | 2  | 1.0                                    | 同上                |               | 2  | 1.0                                    | 同上             |
|             | 3  | 0.8                                    | 同上                |               | 3  | 0.5                                    | 同上             |
|             | 平均 | 0.9                                    |                   |               | 平均 | 0.8                                    |                |

小試験体として測定した物による付着力の整理結果を表2.4-13(3), (4)に示す。

無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭(Ps5-2 および Ps7-2' 杭)の付着強度はタールエポキシ樹脂塗料の凝集破壊が主に見られ、Ps5-2 杭は  $1.8 \sim 3 \times 10^6 \text{N/m}^2$  で曝露部位による差は認められなかった。(表2.4-13(3))

無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭(Ps6-4 および 8-4' 杭)の付着強度は  $1 \times 10^6 \text{N/m}^2$  程度で、破壊箇所はガラスクロスと下塗層間またはジンクリッチペイントの凝集破壊が主に見られた。曝露部位による差は認められなかった。(表2.4-13(4))

表2.4-13(3) 切り出し試験片によるPs5-2およびPs7-2'杭の付着力(2次)測定結果

| 測定<br>部位 | Ps 5-2                     |                     | Ps 7-2'                    |                     |
|----------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
|          | $\times 10^6 \text{N/m}^2$ | 剥離状況(%)             | $\times 10^6 \text{N/m}^2$ | 剥離状況(%)             |
| U1       | 2.7                        | T/E表層剥離             | 2.0                        | T/E表層剥離             |
| U2       | 2.5                        | T/E凝集破壊40 T/E表層剥離60 | 測定できず。                     |                     |
| U3       | 2.8                        | T/E凝集破壊20 T/E表層剥離80 | 2.0                        | Z R凝集破壊90 T/E凝集破壊10 |
| U4       | 1.8                        | T/E凝集破壊100          | 1.5                        | Z R凝集破壊50 T/E凝集破壊50 |
| R1       | 2.8                        | T/E表層剥離             | 2.1                        | T/E表層剥離             |
| R2       | 2.8                        | T/E凝集破壊30 T/E表層剥離70 | 1.5                        | Z R凝集破壊50 T/E凝集破壊50 |
| R3       | 1.8                        | Z R凝集破壊10 T/E凝集破壊90 | 1.5                        | Z R凝集破壊15 T/E表層剥離80 |
| R4       | 3.0                        | T/E凝集破壊20 T/E表層剥離80 | 2.5                        | T/E凝集破壊40 T/E表層剥離60 |

(表中 U:海側、R:陸側を示す。T/E:タールエポキシ層、Z R:ジンクリッチペイントを示す。)

表2.4-13(4) 切り出し試験片によるPs6-4およびPs8-4'杭の付着力(2次)測定結果

| 測定<br>部位 | Ps 6-4                     |                    | Ps 8-4'                    |                     |
|----------|----------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
|          | $\times 10^6 \text{N/m}^2$ | 剥離状況(%)            | $\times 10^6 \text{N/m}^2$ | 剥離状況(%)             |
| U1       | 1.0                        | ガラスクロス/下塗          | 0.6                        | Z R/下塗間30 下塗凝集破壊70  |
| U2       | 1.0                        | ガラスクロス/下塗          | 1.7                        | ガラスクロス/下塗 ガラスクロス/下塗 |
| U3       | <1.0                       | Z R凝集破壊10 下塗凝集破壊90 | 1.3                        | ガラスクロス/下塗 ガラスクロス/下塗 |
| U4       | 1.0                        | ガラスクロス/下塗          | 1.2                        | ガラスクロス/下塗 ガラスクロス/下塗 |
| R1       | <1.0                       | Z R凝集破壊10 下塗凝集破壊90 | 1.5                        | 下塗凝集破壊              |
| R2       | <1.0                       | Z R凝集破壊10 下塗凝集破壊90 | <1.0                       | Z R凝集破壊10 下塗凝集破壊90  |
| R3       | 1.0                        | 下塗/下塗層間            | <1.0                       | ガラスクロス/下塗           |
| R4       | 1.0                        | ガラスクロス/下塗          | 1.0                        | ガラスクロス/下塗           |

(表中 U:海側、R:陸側を示す。Z R:ジンクリッチペイントを示す。)

#### (8)耐衝撃性

曝露各部位の所定の位置より採取した小試験体について「水道鋼管コールタールエナメルと塗覆装 JIS G-3492 6.3.3(4)衝撃試験」に従い、鋼球落下後の被膜状態、被膜はく離面積、ピンホール検査を行い、測定結果を表2.4-14にまとめた。

無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料鋼管杭(Ps5-2 および Ps7-2'杭)は両杭とも落球前の塗膜状態は、干満部で耐電圧5kVでピンホールがあったが、飛沫部や海中部では耐電圧5kVでピンホールがなかった。落球後被膜は凹み+割れ+はがれ、割れ+はがれの破壊状態であり、耐電圧5kVでピンホールが生じた。またはく離面積は2.8~5.5cm<sup>2</sup>の範囲であり、JIS G-3492 に規定された最大値65cm<sup>2</sup>以下で健全性が比較的良好に保持されていると考えられる。

無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス鋼管杭(Ps6-4 および 8-4'杭)のPs6-4杭における落球前の塗膜状態は干満部では目視でやや不健全であったが耐電圧5kVで飛沫部、海中部では健全部が多く、耐電圧10kVでそれぞれピンホールがなかった。落球後被膜は海側と陸側の違いはなく、凹み+割れ+はがれ、割れ+はがれの破壊状態であり、塗膜の破壊は下地まで到達せず、したがってはく離面積はわずかであり、測定しなかった。干満部は耐電圧5kVで、飛沫部、海中部は耐電圧10kVでそれぞれピンホールが生じやや干満部の劣化が進行していた。Ps8-4'杭の落球後被膜破壊状態は凹み状態のみで、海側/陸側、曝露部位の差はなく、ピンホールは耐電圧5kVではなく、10kVで検出され、Ps6-4杭よりも塗膜は健全であった。全体として、ガラスクロス入りでかつ劣化もすくなく22年曝露後の塗膜状態としては耐衝撃性や防食性は無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料よりは、よく保持されていると考えられる。

表2.4-14 落重衝撃試験(室温、650g・2.4m)

| 環境 | 部位   | 杭No.   | 皮 膜 外 観 |                           | ピンホール試験      |              |
|----|------|--------|---------|---------------------------|--------------|--------------|
|    |      |        | 落重前     | 落重後(剥離面積 $\text{cm}^2$ )* | 落重前          | 落重後          |
| 海側 | 飛沫部  | Ps5-2  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(2.8-4.0)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(4.0-4.5)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ                  | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 干満上部 | Ps5-2  | 健全部     | 割れ+剥れ(2.8)                | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | 不健全部    | 割れ                        | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | やや不健全部  | 凹み+割れ+剥れ                  | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 干満下部 | Ps5-2  | やや不健全部  | 凹み+割れ(3.0-3.8)            | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | やや不健全部  | 割れ+剥れ(5.4)                | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ                     | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 海中部  | Ps5-2  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(4.2-4.5)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | 健全部     | 凹み+割れ(5.5)                | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ                  | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
| 陸側 | 飛沫部  | Ps5-2  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(2.8-3.3)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | 健全部     | 凹み+割れ(3.8)                | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ                  | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 干満上部 | Ps5-2  | やや不健全部  | 凹み+割れ+剥れ(3.0-3.5)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | やや不健全部  | 割れ+剥れ(3.8)                | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | やや不健全部  | 凹み+割れ                     | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(10kV) |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 干満下部 | Ps5-2  | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(2.5-3.0)         | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | やや不健全部  | 割れ+剥れ(4.5)                | ピンホール有(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ                     | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(10kV) |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    | 海中部  | Ps5-2  | やや不健全部  | 凹み+割れ+剥れ(3.0-4.5)         | ピンホール無(5kV)  | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps7-2' | 健全部     | 凹み+割れ+剥れ(5.2)             | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(5kV)  |
|    |      | Ps6-4  | 健全部     | 凹み+割れ                     | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |
|    |      | Ps8-4' | 健全部     | 凹み                        | ピンホール無(10kV) | ピンホール有(10kV) |

\* : 付着力測定と同様な部位から採取した試験片を用いて、「水道鋼管コールタールエナメルと塗覆装 JIS G-3492 6.3.3(4) 衝撃試験」により室温、高さ2.4mから鋼球650gを落として測定。  
エナメルの衝撃特性として剥離面積は最大65 $\text{cm}^2$ と規定している。

### (9) 塩化物イオン浸透度

各曝露部位の所定の位置における塗膜への塩分の浸透度を測るために、塗膜断面でClのEPMAの線分析を行った結果の1例を図2.4-3に示し、表2.4-15にまとめた。

(a) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)鋼管杭 (Ps5-2)

鋼素地面素地表面のClのピークはプライマーに混入されたものである。飛沫部、干満部上部、海中部には塗膜にClのピークはみられず、干満部下部の海側・陸側および海中部陸側の塗膜表面近傍にClのピークが見られた。この環境では塗膜表面から40~100 $\mu$ mの位置にCl浸透ピークが見られる。塗膜バルク組成や構造の他にわれや付着生物などの影響も考えられる。

(b) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス鋼管杭 (Ps6-4)

鋼素地面素地表面のClのピークはプライマーに添加されたものである。飛沫部、干満上部、干満下部、海中部の海側と陸側の各部位で塗膜にClのピークが見られた。この環境での塗膜へのCl浸透は240~600 $\mu$ mである。Cl浸透に関しては塗膜のガラスクロス部やわれ付着生物などの劣化の影響も大きいと考えられる。

表 2.4-15 EPMAの線分析による塗膜へのCl浸透度 (表面からの位置)

| 被 覆 系                                        |    | 飛沫部①            | 干満部上部②                | 干満部下部③                | 海中部④                  |
|----------------------------------------------|----|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 無機ジンクリッチペイント+<br>タールエポキシ樹脂塗料<br>(Ps5-2)      | 海側 | —               | —                     | 80 $\mu$ m            | —                     |
|                                              | 陸側 | —               | —                     | 40 $\mu$ m            | 100 $\mu$ m           |
| 無機ジンクリッチペイント+<br>ガラスクロス入りエポキシ樹<br>脂塗料(Ps6-4) | 海側 | 240~660 $\mu$ m | ガラスクロス<br>390 $\mu$ m | ガラスクロス<br>600 $\mu$ m | ガラスクロス<br>480 $\mu$ m |
|                                              | 陸側 | 115~400 $\mu$ m | ガラスクロス<br>390 $\mu$ m | ガラスクロス<br>375 $\mu$ m | 255 $\mu$ m           |

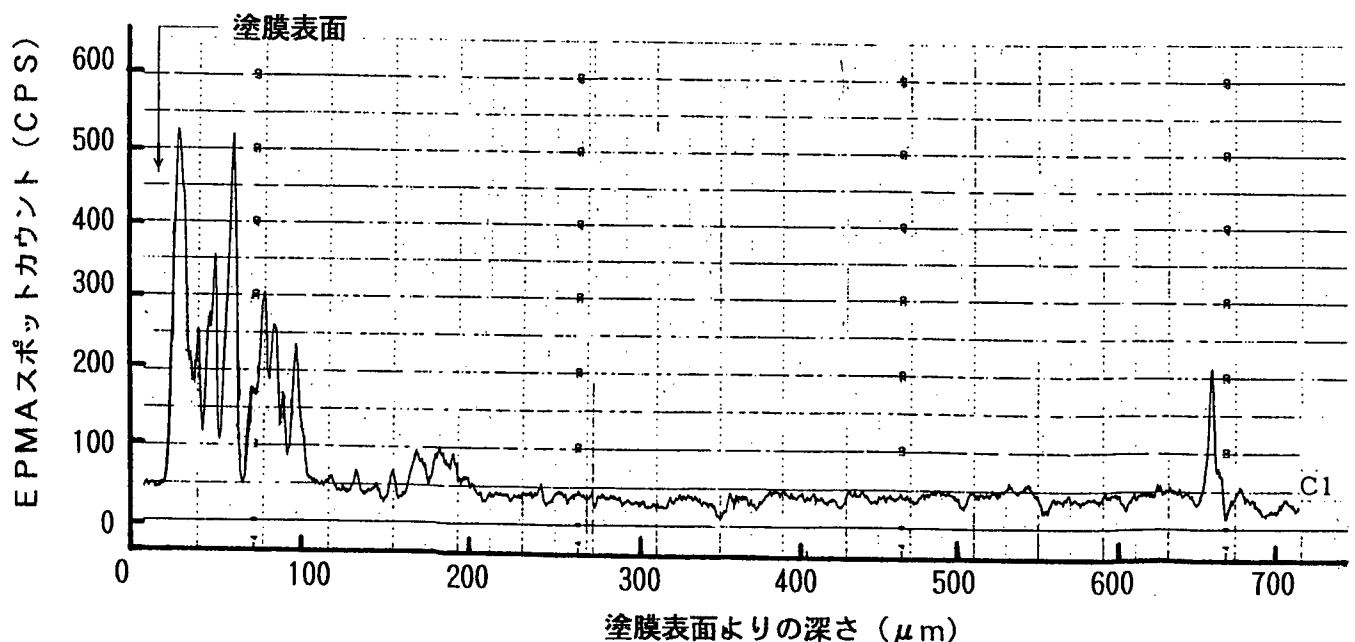


図 2.4-3 EPMAの線分析の例 (表面からの位置)

# (10) 塗膜下腐食

図 2. 2-2 に示す所定の位置での塗膜はく離後の鋼素地腐食状況を表 2. 4-16 に示す。

## (a) 無機ジンクリッチペイント (75 $\mu$ m) + タールエポキシ樹脂塗料 (300 $\mu$ m $\times$ 3) 鋼管杭

(Ps5-2 および Ps7-2' 杭)

Ps5-2 杭では、全体的に飛沫部と海中部で腐食は少なく、素地の全面腐食や孔食はみられず、点錆程度であった。干満部上部では点錆が全面に多く点在し、海中部では部分的にやや大きめなはく離部の腐食がみられ、陸側が海側より素地腐食は軽度であった。Ps7-2' 杭は、Ps5-2 杭とほぼ同様な傾向であった。飛沫部と海中部で腐食はほとんどなかった。

## (b) 無機ジンクリッチペイント (75 $\mu$ m) + エポキシ樹脂塗料 (300 $\mu$ m $\times$ 3) + ガラスクロス鋼管杭

(Ps6-4 および Ps8-4' 杭)

Ps6-4 杭では、飛沫部と海中部で腐食はなく、干満部上部と下部に僅かにみられ、無機ジンクリッチペイント + タールエポキシ樹脂塗料よりも素地腐食は少なかった。また、陸側が海側より素地腐食はやや軽度であった。

Ps8-4' 杭は Ps6-4 杭とほぼ同様な結果であったが、陸側と海側の素地腐食の差は顕著でなかった。

表 2. 4-16 塗膜剥離後の鋼素地腐食の観察結果

| 被覆系                                    | 杭 No.  | 方向 | 飛沫部       | 干満部上部    | 干満部下部     | 海中部       |
|----------------------------------------|--------|----|-----------|----------|-----------|-----------|
| 無機ジンクリッチペイント<br>+ タールエポキシ樹脂塗料          | 5-2-2  | 海側 | 中斑点錆 1ヶ   | 点錆全面点在   | 溶接部中点錆 1ヶ | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 腐食無し     | 腐食無し      | 剥離部腐食やや大  |
|                                        | 5-2-3  | 海側 | 中斑点錆 3ヶ   | 点錆全面点在   | 溶接部中点錆 1ヶ | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 中斑点錆 3ヶ  | 腐食無し      | 剥離部腐食やや大  |
|                                        | 7-2'-2 | 海側 | 腐食無し      | 点錆全面点在   | 点錆部分点在    | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 点錆僅かに点在  | 溶接・母材錆僅か  | 溶接部点錆 1ヶ  |
| 無機ジンクリッチペイント<br>+ エポキシ樹脂塗料<br>+ ガラスクロス | 7-2'-3 | 海側 | 腐食無し      | 点錆部分点在中位 | 点錆部分点在僅か  | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 点錆点在 3ヶ  | 母材部錆点在僅か  | 溶接部点錆 1ヶ  |
|                                        | 6-4-2  | 海側 | 腐食無し      | 小斑点錆 3ヶ  | 小斑点錆 1ヶ   | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 腐食無し     | 腐食無し      | 腐食無し      |
|                                        | 6-4-3  | 海側 | 腐食無し      | 小斑点錆 2ヶ  | 小斑点錆 1ヶ   | 腐食無し      |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 小斑点錆 3ヶ  | 腐食無し      | 腐食無し      |
|                                        | 8-4'-2 | 海側 | 熱影響部点錆 1ヶ | 腐食無し     | 熱影響部部分錆色  | 熱影響部点錆 1ヶ |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 熱影響部部分錆色 | 小斑点錆 2ヶ   | 小斑点錆 3ヶ   |
|                                        | 8-4'-3 | 海側 | 点錆 1ヶ     | 腐食無し     | 腐食無し      | 中斑点錆 1ヶ   |
|                                        |        | 陸側 | 腐食無し      | 小斑点錆 1ヶ  | 微小点錆      | 点錆、部分錆色   |

#### 4. 5 セメントモルタルライニング鋼管杭の調査

セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)鋼管杭(Ps7-7 および9-7' 杭)の所定の位置での各種調査測定結果を以下に述べる。

##### (1) 中性化深さ

Ps7-7 および9-7' 杭のセメントモルタル被覆の中性化深さを表2.4-17 に示す。

Ps7-7 杭のFRPカバーが飛沫部から干満部まで脱落しており、セメントモルタル被覆の中性化深さは海中部(0mm)<干満部下部(0~0.1mm)<干満部上部(0~0.2mm)<飛沫部(0~2.0mm)の順に大きくなっている。

Ps9-7' では、FRPカバーが飛沫部まで脱落しており、セメントモルタル被覆の中性化深さは海中部、干満部下部、干満部上部は中性化しておらず、飛沫部で1~5mmと大きくなっている。

表2.4-17 セメントモルタルの中性化深さ

セメントモルタルの中性化深さ測定値(mm)

| 試料         | 繰り返し | 飛沫部     | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部 |
|------------|------|---------|-------|-------|-----|
| Ps 7-7 海側  | 1    | 0~0.8   | 0~0.2 | 0~0.1 | 0   |
|            | 2    | 1.0~1.5 | 0~0.2 | 0~0.1 | 0   |
|            | 3    | 0~2.0   | 0     | 0~0.1 | 0   |
| Ps 7-7 陸側  | 1    | 0~2.0   | 0     | 0     | 0   |
|            | 2    | 0       | 0     | 0     | 0.1 |
|            | 3    | 0       | 0     | 0     | 0.1 |
| Ps 9-7' 海側 | 1    | 1.0~2.0 | 0     | 0     | 0   |
|            | 2    | 1.0~1.5 | 0     | 0     | 0   |
|            | 3    | 5.0     | 0     | 0     | 0   |
| Ps 9-7' 陸側 | 1    | 0       | 0     | 0     | 0   |
|            | 2    | 0       | 0     | 0     | 0   |
|            | 3    | 0       | 0     | 0     | 0   |

セメントモルタルの中性化深さ最大値 (mm)

| 試料         | 飛沫部 | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部 |
|------------|-----|-------|-------|-----|
| Ps 7-7 海側  | 2.0 | 0.2   | 0.1   | 0   |
| Ps 7-7 陸側  | 2.0 | 0     | 0     | 0.1 |
| Ps 9-7' 海側 | 5.0 | 0     | 0     | 0   |
| Ps 9-7' 陸側 | 0   | 0     | 0     | 0   |

## (2) Cl イオン濃度

Ps7-7 および 9-7' 杭のセメントモルタル被覆の塩化物イオン濃度を表 2.4-18 に示す。

Ps7-7 では、セメントモルタル被覆の塩化物イオン濃度は海中部<干満部下部≒干満部上部<飛沫部の順に増大し、陸側よりも海側が多く、表層から中層、さらに下層へ塩化物イオンが浸透している。

Ps9-7' では、セメントモルタル被覆の塩化物イオン濃度に対する環境部位、海側/陸側、深さ方向の影響は、全般的には Ps7-7 と同様な傾向がみられたが変動巾は小さい。また海側の干満部上部の下層や陸側海中部の表層にやや小さい値がみられた。

## (3) pH

Ps7-7 および 9-7' 杭のセメントモルタル被覆の pH を表 2.4-19 に示す。

Ps7-7 では、海側では中性化の深さが大きい飛沫部の表層の pH が他の部位に比べやや小さく、マクロカソードとなる干満部下部がやや大きかった。陸側では飛沫部の表層の pH が他の部位に比べやや小さかった。両側とも深さ方向の pH 変動は小さかった。

Ps9-7' では、全体的な傾向は Ps7-7 とほぼ同様な傾向であったが、とくに海側の飛沫部表層で pH が低下し、陸側が海側よりやや pH が低下している傾向があった。

表 2.4-18 セメントモルタル中の Cl イオン濃度

Ps 7-7 セメントモルタル中の Cl イオン濃度 (%)

|      | 飛沫部  | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部  |
|------|------|-------|-------|------|
| 海側表層 | 1.56 | 0.60  | 0.76  | 0.40 |
| 中層   | 1.35 | 0.71  | 0.82  | 0.51 |
| 下層   | 0.66 | 0.64  | 0.78  | 0.60 |
| 陸側表層 | 0.98 | 0.57  | 0.78  | 0.38 |
| 中層   | 0.57 | 0.69  | 0.65  | 0.28 |
| 下層   | 0.83 | 0.76  | 0.77  | 0.17 |

Ps 9-7' セメントモルタル中の Cl イオン濃度 (%)

|      | 飛沫部  | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部  |
|------|------|-------|-------|------|
| 海側表層 | 0.17 | 0.73  | 0.66  | 0.52 |
| 中層   | 0.69 | 0.69  | 0.44  | 0.33 |
| 下層   | 1.02 | 0.13  | 0.44  | 0.33 |
| 陸側表層 | 0.78 | 0.53  | 0.28  | 0.19 |
| 中層   | 0.43 | 0.31  | 0.32  | 0.31 |
| 下層   | 0.38 | 0.43  | 0.43  | 0.38 |

表2.4-19 セメントモルタル中の p H

Ps 7-7 セメントモルタル中の p H

|      | 飛沫部  | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部  |
|------|------|-------|-------|------|
| 海側表層 | 11.7 | 12.6  | 12.9  | 12.1 |
| 中層   | 11.4 | 12.5  | 12.8  | 12.4 |
| 下層   | 12.4 | 12.1  | 12.6  | 12.5 |
| 陸側表層 | 12.1 | 12.5  | 12.5  | 12.8 |
| 中層   | 12.6 | 12.6  | 12.5  | 12.6 |
| 下層   | 12   | 12.6  | 12.8  | 12.6 |

Ps9-7' セメントモルタル中の p H

|      | 飛沫部  | 干満部上部 | 干満部下部 | 海中部  |
|------|------|-------|-------|------|
| 海側表層 | 10.3 | 12.2  | 12.8  | 12.4 |
| 中層   | 11.7 | 12.5  | 12.9  | 12.8 |
| 下層   | 12.2 | 12.8  | 12.8  | 12.7 |
| 陸側表層 | 11.1 | 11.3  | 12.1  | 11.9 |
| 中層   | 11.3 | 12.2  | 11.9  | 12.0 |
| 下層   | 12.0 | 12.3  | 11.8  | 11.8 |

## (4) 塗膜下腐食

セメントモルタルを所定の位置で表面からはつりながら被覆中間層の金網や鋼素地面の腐食状況を観察した結果を表2.4-20に示す。

Ps7-7 杭では、FRPカバーが脱落している飛沫部や干満部上部の金網や鋼素地面の腐食が大きく、海中部では腐食はなかった。海側が陸側より腐食が少なかった。

Ps9-7' 杭は、Ps7-7 杭と同様な傾向であるが、陸側が海側より腐食が少なかった。

表2.4-20 セメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭の  
被覆表面・金網・鋼素地面の腐食状況

| 杭No.   | 方向 | 飛沫部 |    |      | 干満部上部 |    |      | 干満部下部 |    |      | 海中部 |    |      |
|--------|----|-----|----|------|-------|----|------|-------|----|------|-----|----|------|
|        |    | 表面  | 金網 | 鋼素地面 | 表面    | 金網 | 鋼素地面 | 表面    | 金網 | 鋼素地面 | 表面  | 金網 | 鋼素地面 |
| Ps7-7  | 海側 | 発錆  | なし | なし   | 発錆    | なし | なし   | なし    | なし | なし   | なし  | なし | なし   |
|        | 陸側 | 発錆  | なし | 錆中   | なし    | なし | 点錆   | 点錆    | なし | なし   | 点錆  | なし | なし   |
| Ps9-7' | 海側 | 露出  | 発錆 | 錆大   | 発錆    | 点錆 | 点錆   | なし    | なし | 錆小   | 点錆  | なし | なし   |
|        | 陸側 | ひび  | 発錆 | 錆中   | なし    | なし | なし   | なし    | なし | なし   | なし  | なし | なし   |

#### 4. 6 有機ライニング鋼管杭の調査

ポリウレタンゴムライニング(7mm)(Ps7-8 および Ps9-8')とポリエチレン押し出しライニング(4mm)(粘着剤仕様)(Ps7-9 および Ps9-9')の各種試験・調査測定結果を以下に示す。

##### (1) 膜厚

調査対象鋼管杭4本を測定した。測定は図2.2-2に示す所定の位置の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の4部位について、各々海側、陸側および両者の中間位置の4箇所、計16箇所行った。測定には電磁膜厚計を用いた。(表中 A:海側, B:中間, C:陸側, D:中間を示す。)測定結果をまとめて表2.4-21に示す。

表 2.4-21 膜厚測定結果 (単位: mm)

| 測定部位 |   | 杭 No.  |      |     |      |
|------|---|--------|------|-----|------|
|      |   | 7-8    | 9-8' | 7-9 | 9-9' |
| 飛沫部  | A | 11.0   | 11.0 | 4.0 | 4.8  |
|      | B | 11.0   | 10.5 | 4.7 | 5.1  |
|      | C | 9.0    | 5.7  | 4.2 | 4.9  |
|      | D | 10.0   | 13.5 | 4.3 | 5.2  |
| 干満上部 | A | 8.5    | 7.0  | 4.2 | 4.6  |
|      | B | (3.8)  | 9.5  | 4.0 | 4.9  |
|      | C | (4.7)  | 6.4  | 4.0 | 4.8  |
|      | D | (2.95) | 11.0 | 4.0 | 4.8  |
| 干満下部 | A | 7.6    | 7.5  | 4.5 | 4.7  |
|      | B | 9.5    | 10.0 | 4.1 | 5.0  |
|      | C | 9.5    | 6.4  | 4.1 | 5.0  |
|      | D | 9.5    | 12.0 | 4.2 | 4.7  |
| 海中部  | A | 9.5    | 8.5  | 4.2 | 4.3  |
|      | B | 7.5    | 7.5  | 4.6 | 4.7  |
|      | C | 7.8    | 7.3  | 4.6 | 4.8  |
|      | D | 8.0    | 9.5  | 4.1 | 4.6  |

( )は上層はく離部

##### (2) ピンホール

調査対象鋼管杭4本を測定した。防食被覆部分の全面を対象としたが、明らかな腐食部位は除いた。測定にはピンホールテスターを用いた。適用電圧は5kVとした。測定結果をまとめて表2.4-22に示す。

表 2.4-22 ピンホール測定結果

| 杭 No. | ピンホールの有無                                  |
|-------|-------------------------------------------|
| 7-8   | 上層はく離のスパイラル溶接ビード上で3箇所検出された。他は良好。          |
| 9-8'  | 全く検出されない。                                 |
| 7-9   | 明らかな被膜割れの箇所以外、ピンホールは検出されない。               |
| 9-9'  | 海側、上端から300cmにある突き傷は素地に達している。その他からは検出されない。 |

### (3) 体積抵抗率

調査対象鋼管杭4本を測定した。測定箇所は図2.2-2に示す所定位置の海側の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の4箇所とした。

測定にはウルトラメガオームメーターを用いた。測定電圧は1,000V。電極は、アルミ箔(10cm×10cm)の対極の周囲に同じアルミ箔製のガード電極を配した構成にし、電解ペースト(3%NaCl水溶液+CMC(カルボキシル・メチル・セルローズ))で測定箇所に貼付した。測定結果を表2.4-23に示す。

表 2.4-23 体積抵抗率

| 杭 No. | 部位    | 膜厚 (μm) | 表面抵抗 (Ω)              | 体積抵抗率 (Ω・cm)          |
|-------|-------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 7-8   | 飛沫部   | 9000    | $1.30 \times 10^8$    | $1.44 \times 10^{10}$ |
|       | 干満部上部 | 4700    | $9.20 \times 10^7$    | $1.96 \times 10^{10}$ |
|       | 干満部下部 | 9500    | $6.50 \times 10^8$    | $6.84 \times 10^{10}$ |
|       | 海中部   | 7800    | $6.30 \times 10^8$    | $8.08 \times 10^{10}$ |
| 9-8'  | 飛沫部   | 5700    | $1.40 \times 10^8$    | $2.46 \times 10^{10}$ |
|       | 干満部上部 | 6400    | $1.60 \times 10^8$    | $2.50 \times 10^{10}$ |
|       | 干満部下部 | 6400    | $4.00 \times 10^8$    | $6.25 \times 10^{10}$ |
|       | 海中部   | 7300    | $4.50 \times 10^7$    | $6.16 \times 10^9$    |
| 7-9   | 飛沫部   | 4200    | $2.20 \times 10^{10}$ | $5.24 \times 10^{12}$ |
|       | 干満部上部 | 4000    | $9.90 \times 10^{10}$ | $2.48 \times 10^{13}$ |
|       | 干満部下部 | 4100    | $7.50 \times 10^{10}$ | $1.83 \times 10^{13}$ |
|       | 海中部   | 4600    | $4.00 \times 10^8$    | $8.70 \times 10^{10}$ |
| 9-9'  | 飛沫部   | 4900    | $1.80 \times 10^9$    | $3.67 \times 10^{11}$ |
|       | 干満部上部 | 4800    | $2.00 \times 10^{11}$ | $4.17 \times 10^{13}$ |
|       | 干満部下部 | 5000    | $5.80 \times 10^{10}$ | $1.16 \times 10^{13}$ |
|       | 海中部   | 4800    | $2.50 \times 10^{10}$ | $5.21 \times 10^{12}$ |

### (4) インピーダンス

調査対象鋼管杭4本を測定した。測定箇所は図2.2-2に示す所定位置の海側の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の4箇所とした。

測定にはインピーダンスメーターを用いた。測定周波数は200Hz, 500Hz, 1000Hzの3種。測定セルは、対極のアルミ箔(10cm×10cm)を電解ペースト(3%NaCl水溶液+CMC(カルボキシル・メチル・セルローズ))で測定面に貼付する方法を採った。測定結果を表2.4-24(1), (2)に示す。

表2.4-24(1) インピーダンス測定結果(I)

| 杭No. | 部位    | 測定周波数(Hz) | R ( $\Omega$ )    | C (F)                 | $\tan \delta$        |
|------|-------|-----------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| 7-8  | 飛沫部   | 200       | $2.4 \times 10^7$ | $2.1 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $1.2 \times 10^7$ | $1.9 \times 10^{-10}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $6.8 \times 10^6$ | $1.9 \times 10^{-10}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|      | 干満部上部 | 200       | $1.6 \times 10^7$ | $2.7 \times 10^{-10}$ | $1.9 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $7.8 \times 10^6$ | $2.5 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $4.7 \times 10^6$ | $2.3 \times 10^{-10}$ | $1.5 \times 10^{-1}$ |
|      | 干満部下部 | 200       | $4.2 \times 10^7$ | $1.2 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $2.0 \times 10^7$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.5 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $1.1 \times 10^7$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ |
|      | 海中部   | 200       | $4.8 \times 10^7$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.5 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $2.4 \times 10^7$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $1.3 \times 10^7$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $1.2 \times 10^{-1}$ |
| 9-8' | 飛沫部   | 200       | $2.0 \times 10^7$ | $2.4 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $1.1 \times 10^7$ | $2.3 \times 10^{-10}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $6.5 \times 10^6$ | $2.2 \times 10^{-10}$ | $1.1 \times 10^{-1}$ |
|      | 干満部上部 | 200       | $2.4 \times 10^7$ | $1.6 \times 10^{-10}$ | $2.1 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $1.3 \times 10^7$ | $1.4 \times 10^{-10}$ | $1.7 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $8.3 \times 10^6$ | $1.3 \times 10^{-10}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ |
|      | 干満部下部 | 200       | $3.6 \times 10^7$ | $1.9 \times 10^{-10}$ | $1.2 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $1.3 \times 10^7$ | $1.8 \times 10^{-10}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $6.0 \times 10^6$ | $1.6 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      | 海中部   | 200       | $2.9 \times 10^7$ | $2.2 \times 10^{-10}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 500       | $1.0 \times 10^7$ | $2.0 \times 10^{-10}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ |
|      |       | 1000      | $5.0 \times 10^6$ | $1.8 \times 10^{-10}$ | $1.7 \times 10^{-1}$ |

表2.4-24(1) インピーダンス測定結果(II)

| 杭No. | 部位    | 測定周波数(Hz) | R ( $\Omega$ )    | C (F)                 | $\tan \delta$        |
|------|-------|-----------|-------------------|-----------------------|----------------------|
| 7-9  | 飛沫部   | 200       | $3.3 \times 10^8$ | $7.4 \times 10^{-11}$ | $3.2 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $2.0 \times 10^8$ | $7.3 \times 10^{-11}$ | $2.2 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $1.1 \times 10^8$ | $7.2 \times 10^{-11}$ | $2.0 \times 10^{-2}$ |
|      | 干満部上部 | 200       | $2.0 \times 10^8$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $3.8 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $6.7 \times 10^7$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $4.6 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $3.1 \times 10^7$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $5.0 \times 10^{-2}$ |
|      | 干満部下部 | 200       | $1.0 \times 10^9$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $8.0 \times 10^{-3}$ |
|      |       | 500       | $1.0 \times 10^9$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $3.2 \times 10^{-3}$ |
|      |       | 1000      | $3.3 \times 10^8$ | $1.0 \times 10^{-10}$ | $4.7 \times 10^{-3}$ |
|      | 海中部   | 200       | $5.0 \times 10^8$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.5 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $2.0 \times 10^8$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.5 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $8.3 \times 10^7$ | $1.1 \times 10^{-10}$ | $1.8 \times 10^{-2}$ |
| 9-9' | 飛沫部   | 200       | $1.7 \times 10^8$ | $8.5 \times 10^{-11}$ | $5.6 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $5.3 \times 10^7$ | $8.7 \times 10^{-11}$ | $7.0 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $2.4 \times 10^7$ | $7.9 \times 10^{-11}$ | $8.5 \times 10^{-2}$ |
|      | 干満部上部 | 200       | $5.0 \times 10^8$ | $8.1 \times 10^{-11}$ | $2.0 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $2.0 \times 10^8$ | $8.0 \times 10^{-11}$ | $2.0 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $8.3 \times 10^7$ | $7.9 \times 10^{-11}$ | $2.4 \times 10^{-2}$ |
|      | 干満部下部 | 200       | $1.0 \times 10^9$ | $7.8 \times 10^{-11}$ | $1.0 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $2.5 \times 10^8$ | $7.8 \times 10^{-11}$ | $1.6 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $1.3 \times 10^8$ | $7.7 \times 10^{-11}$ | $1.6 \times 10^{-2}$ |
|      | 海中部   | 200       | $1.7 \times 10^8$ | $9.1 \times 10^{-11}$ | $5.3 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 500       | $5.9 \times 10^7$ | $8.8 \times 10^{-11}$ | $6.2 \times 10^{-2}$ |
|      |       | 1000      | $3.2 \times 10^7$ | $8.4 \times 10^{-11}$ | $5.9 \times 10^{-2}$ |

(5) ショアD硬度

調査対象鋼管杭4本を測定した。測定箇所は図2.2-2に示す所定位置の海側の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の4箇所とした。測定はJIS K 7215に準拠し、ショア硬度計Dタイプを用いて測定した。測定結果を表2.4-25に示す。

表 2.4-25 ショアD硬度測定結果

| 測定部位 | 杭 No. |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
|      | 7-8   | 9-8'  | 7-9   | 9-9'  |
| 飛沫部  | 40    | 40    | 62    | 52    |
|      | 42    | 42    | 64    | 52    |
|      | 40    | 40    | 65    | 48    |
|      | 平均 41 | 平均 41 | 平均 64 | 平均 51 |
| 干満上部 | 42    | 39    | 58    | 42    |
|      | 40    | 39    | 57    | 48    |
|      | 38    | 38    | 60    | 50    |
|      | 平均 40 | 平均 39 | 平均 58 | 平均 47 |
| 干満下部 | 42    | 41    | 65    | 54    |
|      | 42    | 41    | 64    | 50    |
|      | 42    | 41    | 62    | 50    |
|      | 平均 42 | 平均 41 | 平均 64 | 平均 51 |
| 海中部  | 41    | 43    | 60    | 42    |
|      | 42    | 43    | 64    | 46    |
|      | 40    | 42    | 61    | 48    |
|      | 平均 41 | 平均 43 | 平均 62 | 平均 45 |

(6) ピール強度

調査対象鋼管杭4本を測定した。測定箇所は図2.2-2に示す所定位置の海側の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の4箇所とした。

測定はJIS G 3469に準拠して行った。測定結果を表2.4-26に示す。

表 2.4-26 ピール強度測定結果 (単位  $\times 10^3 \text{N/m}$ )

| 測定部位 | 杭 No. |       |                          |                          |
|------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|
|      | 7-8   | 9-8'  | 7-9                      | 9-9'                     |
| 飛沫部  | 7     | 15    | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) |
|      | 8     | 17    |                          |                          |
|      | 7     | 15    |                          |                          |
|      | 平均 7  | 平均 16 |                          |                          |
| 干満上部 | 17    | 16    | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) |
|      | 18    | 21    |                          |                          |
|      | 12    | 23    |                          |                          |
|      | 平均 14 | 平均 20 |                          |                          |
| 干満下部 | 18    | 13    | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) |
|      | 18    | 15    |                          |                          |
|      | 18    | 11    |                          |                          |
|      | 平均 18 | 平均 13 |                          |                          |
| 海中部  | 16    | 3     | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) | 測定不能<br>(切り込みで<br>既にはく離) |
|      | 15    | 12    |                          |                          |
|      | 16    | 18    |                          |                          |
|      | 平均 16 | 平均 11 |                          |                          |

# (7) 衝撃強度試験

調査対象鋼管杭 4 本を測定した。測定箇所は図 2.2-2 に示す所定位置の海側の飛沫部、干満部上部、干満部下部および海中部の 4 箇所とした。

測定は JIS G-3492 6.3.3(4) 衝撃試験に準拠して行った。重量 650g の鋼球を高さ 2400 mm から落下させ、被膜の状態を観察した。測定結果を表 2.4-27 に示す。

表 2.4-27 衝撃強度測定結果

| 測定部位 | 杭 No.  |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|
|      | 7-8    | 9-8'   | 7-9    | 9-9'   |
| 飛沫部  | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし |
| 干満上部 | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし |
| 干満下部 | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし |
| 海中部  | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし | 被膜損傷なし |

# (8) 被膜強度

調査対象鋼管杭 4 本から試験片を採取した。採取箇所は海側の飛沫部および海中部の 2 箇所とした。

ポリウレタンゴムライニング材の引張試験は JIS K-6301 加硫ゴム物理試験方法に準拠し、3 号試験片、試験速度 500 mm/min で行い、破断強度、伸び率を求めた。

ポリエチレン押し出しライニング材の引張試験は JIS K-6760 ポリエチレン試験方法に準拠し、JIS K-7113 2 号試験片、試験速度 50 mm/min で行い、破断強度、降伏点強度、伸び率を求めた。試験結果を表 2.4-28 に示す。

表 2.4-28 被膜強度測定結果

| 杭 No. | 部位  | 破断強度( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 降伏点強度( $\times 10^6 \text{N/m}^2$ ) | 破断伸び (%) |
|-------|-----|------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| 7-8   | 飛沫部 | 15.1                               | —                                   | 400      |
|       | 海中部 | 10.4                               | —                                   | 190      |
| 9-8'  | 飛沫部 | 17.4                               | —                                   | 380      |
|       | 海中部 | 21.2                               | —                                   | 410      |
| 7-9   | 飛沫部 | 12.6                               | 21.6                                | 475      |
|       | 海中部 | 13.2                               | 21.6                                | 500      |
| 9-9'  | 飛沫部 | 10.8                               | 7.89                                | 440      |
|       | 海中部 | 13.3                               | 9.20                                | 470      |

(9)被膜メルトインデックス(M. I.)

対象はNo.7-9 およびNo.9-9' の2本である。試料採取箇所は海側の飛沫部および海中部の2箇所とした。測定はJIS K-7210 熱可塑性プラスチックの流れ試験方法 A法(手動切取り法)に準拠し、試験温度190℃、試験荷重2.16kgfで行った。測定結果を表2.4-29に示す。

表 2.4-29 被膜 M.I. 測定結果

| 杭 No. | 部位  | M. I. (g/10min) |
|-------|-----|-----------------|
| 7-8   | 飛沫部 | —               |
|       | 海中部 | —               |
| 9-8'  | 飛沫部 | —               |
|       | 海中部 | —               |
| 7-9   | 飛沫部 | 0.48            |
|       | 海中部 | 0.32            |
| 9-9'  | 飛沫部 | 0.20            |
|       | 海中部 | 0.14            |

(10)被膜密度

調査対象鋼管杭4本から試験片を採取した。採取箇所は海側の飛沫部および海中部の2箇所とした。測定はJIS K-7112 プラスチックの密度と比重の測定方法 A法(水中置換法)に準拠して行った。測定結果を表2.4-30に示す。

表 2.4-30 被膜密度測定結果

| 杭 No. | 部位  | 密度 ( $\times 10^6 \text{g/m}^3 / 23^\circ\text{C}$ ) |
|-------|-----|------------------------------------------------------|
| 7-8   | 飛沫部 | 1.110                                                |
|       | 海中部 | 1.102                                                |
| 9-8'  | 飛沫部 | 1.111                                                |
|       | 海中部 | 1.110                                                |
| 7-9   | 飛沫部 | 0.961                                                |
|       | 海中部 | 0.961                                                |
| 9-9'  | 飛沫部 | 0.948                                                |
|       | 海中部 | 0.934                                                |

(11)防食被覆はく離調査

調査対象の鋼管杭4本とも、海側および陸側の、それぞれ飛沫部上部、飛沫部下部、干満部および海中部4箇所、計8箇所を調査した。

はく離前の被膜外観を撮影後、被膜に20cm×20cmの切込みを入れ、エアータガねで被膜をはがして除去し、鋼表面の状態を記録した。調査箇所それぞれの被膜はく離後の外観観察結果を表2.4-31(1)、(2)に示す。

表 2.4-31(1) 被膜はく離後表面観察結果 (1)

| 部位        | 杭 No. 7-8      |                 | 杭 No. 9-8'                |                                |
|-----------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|
|           | 海側             | 陸側              | 海側                        | 陸側                             |
| 飛沫部<br>上部 | 発錆なし<br>被膜密着良好 | 発錆なし<br>被膜密着良好  | 薄い発錆<br>赤錆、黒錆の混合          | 部分的な発錆<br>赤錆、黒錆の混合<br>下方に少し金属面 |
| 飛沫部<br>下部 | 発錆なし<br>被膜密着良好 | 発錆なし<br>被膜はく離容易 | 発錆なし<br>被膜密着良好            | 発錆なし<br>被膜密着良好                 |
| 干満部       | 発錆なし           | 発錆なし<br>被膜密着良好  | 発錆なし<br>被膜密着良好            | 発錆なし<br>被膜密着良好                 |
| 海中部       | 発錆なし           | 発錆なし<br>一部黒色部あり | 表面茶褐色<br>発錆はない<br>被膜はく離容易 | 発錆なし<br>被膜密着良好                 |

表 2.4-31(2) 被膜はく離後表面観察結果 (2)

| 部位        | 杭 No. 7-9                   |                             | 杭 No. 9-9'                   |                    |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|
|           | 海側                          | 陸側                          | 海側                           | 陸側                 |
| 飛沫部<br>上部 | 部分的な発錆<br>赤錆が縞状に<br>被膜はく離容易 | 部分的な発錆<br>赤錆が縞状に            | 薄い発錆<br>赤錆、黒錆の混合             | 部分的な発錆<br>赤錆が縞状に   |
| 飛沫部<br>下部 | 部分的な発錆<br>赤錆が縞状に            | 部分的な発錆<br>黒錆主、赤錆少々<br>縞状    | 薄い発錆<br>赤錆、黒錆の混合             | 部分的な発錆<br>赤錆少々、縞状に |
| 干満部       | 部分的な発錆<br>赤錆がほぼ全面に          | 部分的な発錆<br>点錆が全面に<br>上方に水浸入部 | 薄い発錆<br>黒錆が主、赤錆少々            | 全面腐食<br>(被膜損壊部から)  |
| 海中部       | 部分的な発錆<br>赤錆少々、縞状に          | 部分的な発錆<br>細かな点錆             | 部分的な発錆<br>赤錆少々、縞状に、<br>粘着層残る | 部分的な発錆<br>点錆が全面に   |

(12)鋼表面の部分腐食調査

はく離調査の結果、No.7-9、No.9-9' 杭では一部にすき間からの発錆が認められたので、鋼材厚みの測定を行った。

エアータガねで被膜をはく離除去し、鋼表面の状態を記録した同一箇所です錆を除去した後、超音波厚み計で鋼材厚みの測定を行った。

また、鋼面に錆の発生が見られたNo.7-9 杭およびNo.9-9' 杭について、海側海中部の鋼面 10cm×10cm 範囲の錆を採取し、重量測定およびその鉄含有量分析により腐食量を求めた。鋼材厚み調査結果を表 2.4-32(1)に示す。錆重量測定による腐食量測定結果を表 2.4-32(2)に示す。

粘着剤の劣化によるすき間に見られる発錆は、極く微量であることがわかる。また、X線回折でチェックしたが、錆はマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) が主体でClの侵入は極く微量であった。

表 2.4-32(1) 鋼材厚み

(単位：mm)

| 上端からの位置/m |    | 0.5   | 1.6   | 3.0   | 5.0  | 5.5  | 6.5  |
|-----------|----|-------|-------|-------|------|------|------|
| 測定部位      |    | 飛沫部上部 | 飛沫部下部 | 干満部   | 海中部  | 海中端部 | 被覆外  |
| No.7-8    | 海側 | 13.0  | 13.3  | 13.4  | 13.5 | -    | 9.2  |
|           | 陸側 | 13.1  | 13.4  | 13.5  | 13.2 | 13.2 | 11.2 |
| No.9-8'   | 海側 | 13.3  | 13.3  | 13.0  | 12.8 | 13.2 | 6.0  |
|           | 陸側 | 13.3  | 13.3  | 13.2  | 13.3 | -    | 6.8  |
| No.7-9    | 海側 | 13.1  | 13.0  | 13.0  | 13.2 | 13.3 | 6.3  |
|           | 陸側 | 13.2  | 13.4  | 13.0  | 13.2 | -    | 7.0  |
| No.9-9'   | 海側 | 12.8  | 13.4  | 12.7  | 13.0 | -    | 8.0  |
|           | 陸側 | 13.8  | 13.8  | 10.0* | 12.9 | -    | 7.0  |

\*曝露 1 1 年経過後の外観観察時点で被覆に損傷が認められた箇所。

表 2.4-32(2) 腐食量測定結果

| 測定箇所       | 採取錆重量<br>/g/100cm <sup>2</sup> | 鉄含有量<br>% | 腐食量*<br>/mm | 腐食速度<br>/mm/yr |
|------------|--------------------------------|-----------|-------------|----------------|
| No.7-9 飛沫部 | 0.342                          | 60.71     | 0.00264     | 0.000126       |
|            | 0.287                          |           | 0.00222     | 0.000106       |
| No.7-9 海中部 | 0.222                          | 60.29     | 0.00170     | 0.000081       |
|            | 0.117                          |           | 0.00090     | 0.000043       |
| No.9-9'海中部 | 0.404                          | 60.71     | 0.00316     | 0.000150       |
|            | 0.261                          |           | 0.00204     | 0.000097       |

\*鉄密度 7.86g/cm<sup>3</sup>として計算

## 5. 調査結果の検討

### 5. 1 無防食(炭素鋼無処理)鋼管杭 (Ps9-1)

- (1) 管外面では、海洋大気～飛沫部の腐食が大きく、飛沫部の最大腐食速度は海側(0.32mm/yr)が陸側(0.22mm/yr)より大きかった。腐食速度は、干満部(0.039mm/yr)では小さくなり、海中部(0.067mm/yr)ではやや大きくなり、土中部(0.028mm/yr)では非常に小さくなった。
- (2) 管内面の腐食はほとんど見られなかった。
- (3) 阿字ヶ浦沖では、漂砂による腐食磨耗が認められた。(図 2.5-1) また、ガードリング(無防食鋼管杭の外周に装置した鞘管)の腐食磨耗に対する効果があったと推定される。(図 2.5-1)

### 5. 2 耐海水鋼(Cr-Al 系)(6mm)巻き鋼管杭 (Ps5-1')

- (1) 被覆金属の耐海水鋼の腐食は、炭素鋼と同じプロファイルとなり、干満部下部<海中部<干満部上部<飛沫部の順に増大する。(図 2.5-2)
- (2) 耐海水鋼の平均腐食速度は、飛沫部では炭素鋼と同様に腐食速度が著しく大きく(0.16~0.27mm/yr 以上)、貫通孔が多く発生した。(図 2.5-2)
- (3) 耐海水鋼の被覆下部と接する水中の鋼素地面金属(炭素鋼)では、異種金属接触腐食により境界直近に大きな貫通孔が発生した。(図 2.3-1(1))

### 5. 3 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)鋼管杭 (Ps5-2、Ps7-2')

- (1) 付着力が $2 \times 10^6 \text{N/m}^2$ (20kgf/cm<sup>2</sup>)以上で、タールエポキシ樹脂塗料またはジンクリッチペイントの凝集破壊であり、付着性は問題ない状態であると考えられる。(表 2.5-1)
- (2) 電気抵抗値が $10^6 \Omega$ 以上、また体積固有抵抗も $10^{14} \Omega$ 以上あり、交流インピーダンスの $\tan \delta$ も1以下と、防食塗膜として良好なレベルにあると考えられる。(表 2.5-1)
- (3) 全体に現在も良好な防食性を有していると考えられるが、干満部に漂流物によると推定されるダメージ傷が多く、付着生物の除去跡からの発錆が多い傾向が認められた。塗膜はく離後の素地の腐食は点錆程度で小さかった。

### 5. 4 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス鋼管杭 (Ps6-4、Ps8-4')

- (1) 付着力がタールエポキシ樹脂塗料に比較して低下している点、はく離界面がガラスクロスと塗料の層間である事から、クロスと塗料との馴染みの問題でクロスの網目の大きさに、ある程度の粗さがないと、塗料同士の結合ができない。塗膜はく離後の素地の腐食は点錆程度であり、現在も良好な防食性を維持しているものと判断される。(表 2.5-1)
- (2) 交流インピーダンスで $\tan \delta$ が1以上であり、体積固有抵抗は $10^9 \Omega$ であるが、防食塗膜としてタールエポキシ塗料に比べて劣る。(表 2.5-1)
- (3) 全体に良好な防食性を維持しているものと考えられる。特にタールエポキシ塗料と比べダメージ傷が少なく、外観上発錆が少なかった。

### 5. 5 セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)鋼管杭 (Ps7-7、Ps9-7')

- (1) FRPカバーがPs7-7では飛沫部から干満部まで、Ps9-7'では飛沫部で脱落しており、セメントモルタルの脱落した部位もあり、飛沫部で中性化、塩素の侵入、pHの低下が他部位に比較して進行していた。(表 2.5-2)
- (2) FRPカバーが脱落している飛沫部のセメントモルタル中の金網や、鋼管杭素地には発錆が認められ、セメントモルタルの脱落した部位では素地腐食は大きかった。FRPカバーの脱落していない海中部では腐食は認められなかった。

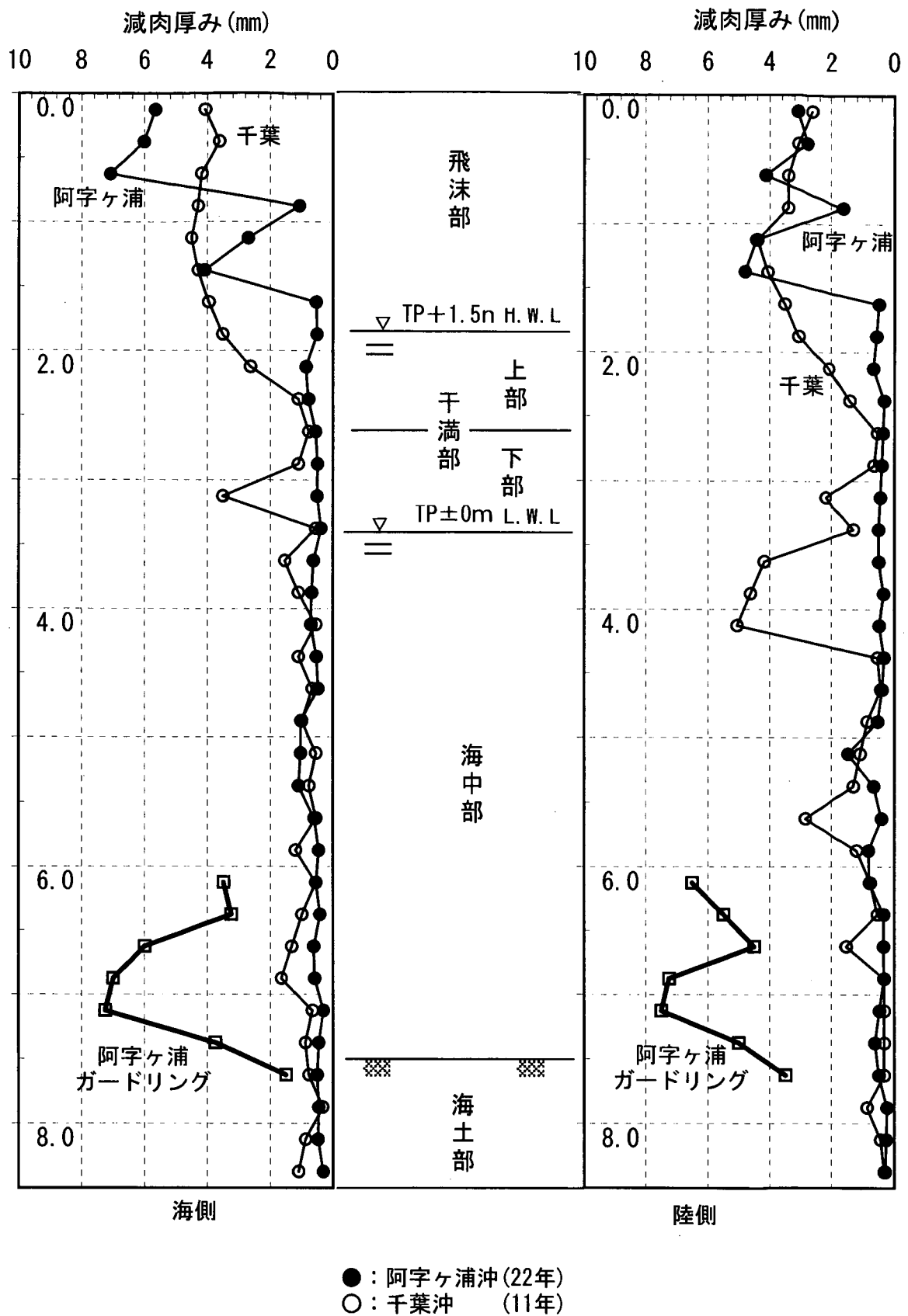
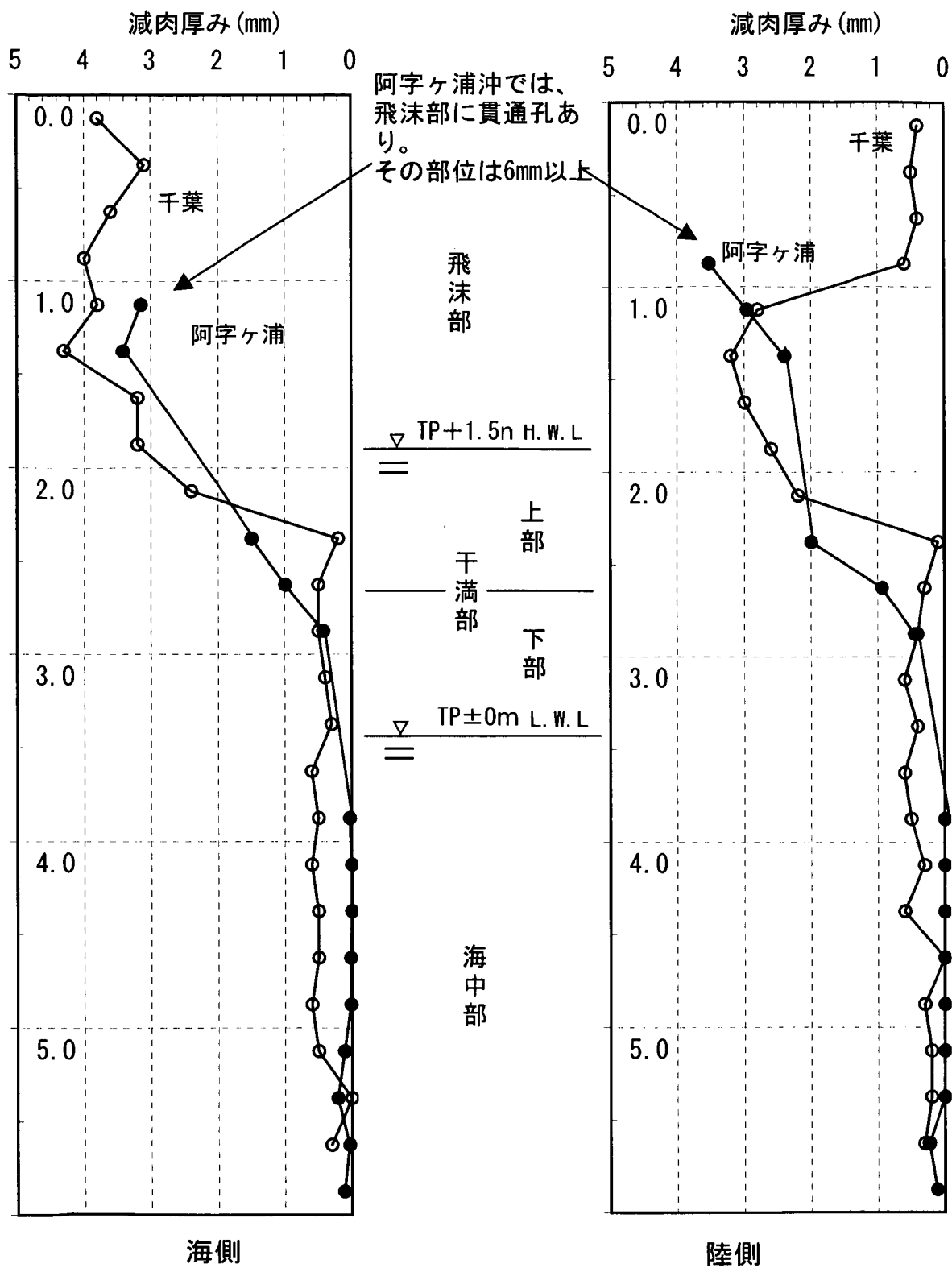


図 2.5-1 無防食(炭素鋼)鋼管杭の腐食減肉厚みプロフィール



● : 阿字ヶ浦沖 (22年)  
○ : 千葉沖 (11年)

図 2.5-2 耐海水鋼(Cr-Al系)巻き鋼管杭の腐食減肉厚みプロフィール

表2.5-1 各種塗装系鋼管杭の調査結果

| 塗装系                                              | 曝露場所  | 測定部位  | 外観観察<br>注1) | ピンホール<br>(個/本) | 膜厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | 鉛筆<br>硬度 | 電気抵抗(1 kHz)<br>( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) | 体積固有抵抗<br>( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) | 交流インピーダンス<br>( $\tan \delta$ at 1kHz) | 付着強度<br>( $\times 10^6 \text{N}/\text{m}^2$ ) | Cl浸透度<br>(EPMA)   | 被覆剥離後<br>素地観察結果 注2) |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------------|----------------|-------------------------|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| 無機ジンクリッチ<br>ペイント<br>+<br>タールエポキシ<br>樹脂塗料         | 阿字ヶ浦沖 | 飛沫部   | B           | 15             | 1056                    | H        | $9.8 \times 10^8$                             | $3.5 \times 10^{14}$                   | 0.06                                  | 2.6                                           | ---               | A B                 |
|                                                  |       | 干満部上部 | C           | 5              | 1118                    | H        | $9.8 \times 10^8$                             | $3.3 \times 10^{14}$                   | 0.23                                  | 2.4                                           | ---               | A B                 |
|                                                  |       | 干満部下部 |             | 15             | 1227                    | H        | $1.0 \times 10^9$                             | $2.4 \times 10^{14}$                   | 0.21                                  | 2.6                                           | $80 \mu\text{m}$  | A B                 |
|                                                  |       | 海中部   | B           | 13             | 1265                    | H        | $9.9 \times 10^8$                             | $3.0 \times 10^{14}$                   | 0.38                                  | 2.2                                           | $100 \mu\text{m}$ | A B                 |
|                                                  | 千葉沖   | 飛沫部   | B           | 6              | 1273                    | H        | $4.1 \times 10^8$                             | $5.9 \times 10^{12}$                   | 0.12                                  | 2.4                                           |                   | A B                 |
|                                                  |       | 干満部上部 | B           | 4              | 1270                    | H        | $5.7 \times 10^8$                             | $4.5 \times 10^{12}$                   | 0.09                                  | 3                                             |                   | A B                 |
|                                                  |       | 干満部下部 |             | 2              | 1335                    | H        | $2.6 \times 10^8$                             | $4.3 \times 10^{12}$                   | 0.10                                  | 2.3                                           |                   | A B                 |
|                                                  |       | 海中部   | B           | 1              | 1183                    | H        | $3.8 \times 10^8$                             | $4.8 \times 10^{12}$                   | 0.10                                  | 2.9                                           |                   | A B                 |
| 無機ジンクリッチ<br>ペイント<br>+<br>エポキシ樹脂塗料<br>+<br>ガラスクロス | 阿字ヶ浦沖 | 飛沫部   | B           | 2              | 1062                    | H        | $5.7 \times 10^6$                             | $4.0 \times 10^9$                      | 0.49                                  | 0.7                                           | $350 \mu\text{m}$ | A B                 |
|                                                  |       | 干満部上部 | B           | 5              | 1142                    | H        | $3.5 \times 10^6$                             | $3.1 \times 10^9$                      | 1.95                                  | 0.9                                           | $390 \mu\text{m}$ | A B                 |
|                                                  |       | 干満部下部 |             | 3              | 1339                    | H        | $2.3 \times 10^6$                             | $3.6 \times 10^9$                      | 1.02                                  | 0.8                                           | $490 \mu\text{m}$ | A B                 |
|                                                  |       | 海中部   | B           | 2              | 1194                    | H        | $1.8 \times 10^6$                             | $4.6 \times 10^9$                      | 1.95                                  | 0.9                                           | $370 \mu\text{m}$ | A B                 |
|                                                  | 千葉沖   | 飛沫部   | B           | 11             | 1113                    | B        | $2.5 \times 10^6$                             | $2.6 \times 10^{13}$                   | 0.29                                  | 0.5                                           |                   | A B                 |
|                                                  |       | 干満部上部 | B           | 2              | 1148                    | 3 H      | $1.2 \times 10^6$                             | $2.6 \times 10^{13}$                   | 1.37                                  | 0.9                                           |                   | A B                 |
|                                                  |       | 干満部下部 |             | 1              | 1135                    | 4 H      | $2.1 \times 10^6$                             | $2.4 \times 10^{13}$                   | 7.33                                  | 1                                             |                   | A B                 |
|                                                  |       | 海中部   | A           | 0              | 1055                    | 3 H      | $1.8 \times 10^6$                             | $3.0 \times 10^{13}$                   | 1.33                                  | 0.8                                           |                   | A B                 |

注1) : 評価A, B, C, Dの順で良好な度合いを示す

注2) : A ; 発錆なし、B ; 点錆程度、C ; 錆面積率10~50%、D ; 50%以上全面錆

表2.5-2 セメントモルタルライニング鋼管杭の調査結果

| 被覆系                             | 曝露場所  | 調査位置      | 外観観察 | 中性化深さ<br>(mm) | Clイオン濃度<br>(%) | pH   | 塗膜下腐食観察結果 |       |       |
|---------------------------------|-------|-----------|------|---------------|----------------|------|-----------|-------|-------|
|                                 |       |           |      |               |                |      | 裏面観察      | 金網の腐食 | 素地面腐食 |
| セメントモルタルライニング<br>＋<br>ポリエステルカバー | 阿字ヶ浦沖 | 飛沫部       | D    | 5.0           | 0.9            | 11.3 | C         | C     | D     |
|                                 |       | 干満部<br>上部 | C    | 0.2           | 0.6            | 12.1 | C         | B     | B     |
|                                 |       | 干満部<br>下部 |      | 0.1           | 0.6            | 12.6 | B         | A     | C     |
|                                 |       | 海中部       | B    | 0.1           | 0.4            | 12.3 | B         | A     | A     |
| セメントモルタルライニング                   | 千葉沖   | 飛沫部       | B    | 5.2           | 0.5            | 11.6 | ---       | ---   | ---   |
|                                 |       | 干満部<br>上部 | B    | 2.5           | 0.7            | 11.6 | ---       | ---   | ---   |
|                                 |       | 干満部<br>下部 |      |               |                |      | ---       | ---   | ---   |
|                                 |       | 海中部       | B    | 0.9           | 0.4            | 11.6 | ---       | ---   | ---   |

### 5. 6 ポリウレタンゴムライニング(7mm)鋼管杭 (Ps7-8、Ps9-8')

- (1) 飛沫, 干満部の海, 陸側の側面で、ポリウレタンゴム被覆層(2層構成)が、層間ではく離しているのが認められた。(これは施工傷が拡大したものと考えられる。)
- (2) 層間ではく離部を除いて、膜厚や膜物性に大きな違いはなかった。
- (3) インピーダンス, 被膜抵抗値, 付着力は、良好な値を示していた。被膜はく離後の素地観察では、層間ではく離部や、大気, 飛沫, 干満部に部分的な発錆部位があったが、鋼素地面腐食は進行していなかった。(表 2.5-3)

### 5. 7 ポリエチレン押し出しライニング(4mm)(粘着剤仕様)鋼管杭 (Ps7-9、Ps9-9')

- (1) 干満部の一部において被覆のはく離・損傷が認められた。損傷部, はく離部では発錆が認められた。(これは漂砂観測用工事または調整時の傷が波浪などで拡大したためと推定される。)
- (2) ポリエチレン材ははく離, 損傷部を除いて膜厚や膜物性に大きな違いはなかった。(表 2.5-3)
- (3) 被膜はく離後の素地観察で、飛沫, 干満部の一部に粘着剤消失し、赤錆や黒錆が観察された部分があった。しかし、この腐食速度は、0.0001mm/yr と非常に小さい。(表 2.5-3)
- (4) ポリエチレン被覆材は、健全であるとの物性を示しているので、高分子材と鋼材とのより耐久性のある接合材の選択の問題といえる。

表 2.5-3 各種ライニング系鋼管杭の調査結果

| ライニング系                     |     | 曝露場所  | 測定部位  | 外観観察<br>注1) | ピンホール<br>(個/本) | 膜厚<br>(mm) | 硬度<br>(ショア-D) | 皮膜密度<br>(g/cm <sup>2</sup> ) | 破断強度<br>(×10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) | 体積固有抵抗<br>(Ω・cm)     | 交流インピーダンス<br>(tanδ at 1kHz) | 付着強度<br>(×10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> ) | 被覆剥離後<br>素地観察結果             |
|----------------------------|-----|-------|-------|-------------|----------------|------------|---------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| ポリエチレン<br>ライニング<br>(粘着剤仕様) | 高密度 | 阿字ヶ浦沖 | 飛沫部   | A           | なし             | 4.7        | 64            | 0.961                        | 12.6                                         | 475       | 5.2×10 <sup>12</sup> | 0.02                        | ---                                          | B C 腐食速度 注3)<br>0.0001mm/yr |
|                            |     |       | 海中部   | A           | //             | 4.4        | 62            | 0.961                        | 13.2                                         | 500       | 8.7×10 <sup>10</sup> | 0.02                        | ---                                          | B C                         |
|                            |     |       | 飛沫部   | A           | //             | 4.5        | 51            | 0.948                        | 10.8                                         | 440       | 3.7×10 <sup>11</sup> | 0.08                        | ---                                          |                             |
|                            |     |       | 海中部   | A           | //             | 4.5        | 45            | 0.934                        | 13.3                                         | 470       | 5.2×10 <sup>12</sup> | 0.06                        | ---                                          | B C 腐食速度 注3)<br>0.0001mm/yr |
|                            | 低密度 | 千葉沖   | 飛沫部   | A           | //             |            | 65            | 0.967                        | 15.5                                         | 246       |                      |                             | 0.23                                         | A                           |
|                            |     |       | 海中部   | A           | //             |            | 65            | 0.966                        | 13.6                                         | 273       |                      |                             | 0.21                                         | A                           |
|                            |     |       | 飛沫部   | A           | //             |            | 47            | 0.937                        | 16.4                                         | 590       |                      |                             | 0.25                                         | A                           |
|                            |     |       | 海中部   | A           | //             |            | 45            | 0.937                        | 14.0                                         | 520       |                      |                             | 0.26                                         | A                           |
| ポリウレタンゴム<br>ライニング          | 高密度 | 阿字ヶ浦沖 | 飛沫部   | A/C         | //             | 10.2       | 41            | 1.110                        | 16.3                                         | 390       | 1.5×10 <sup>10</sup> | 0.13                        | 1.2                                          | A                           |
|                            |     |       | 干満部上部 | B/C         | //             | 8.5        | 40            | 1.102                        |                                              |           | 2.3×10 <sup>10</sup> | 0.15                        | 1.7                                          | A                           |
|                            |     |       | 干満部下部 |             | //             | 9          | 42            | 1.111                        |                                              |           | 6.6×10 <sup>10</sup> | 0.14                        | 1.6                                          |                             |
|                            |     |       | 海中部   | A           | //             | 8.2        | 42            | 1.110                        | 15.8                                         | 300       | 7.1×10 <sup>10</sup> | 0.12                        | 1.4                                          | A B                         |
|                            | 低密度 | 千葉沖   | 飛沫部   |             |                |            |               |                              |                                              |           |                      |                             |                                              |                             |
|                            |     |       | 干満部上部 |             |                |            |               |                              |                                              |           |                      |                             |                                              |                             |
|                            |     |       | 干満部下部 |             |                |            |               |                              |                                              |           |                      |                             |                                              |                             |
|                            |     |       | 海中部   |             |                |            |               |                              |                                              |           |                      |                             |                                              |                             |

注1)：評価A，B，C，Dの順で良好な度合いを示す

注2)：A；発錆なし、B；点錆程度、C；薄い錆、D；激しい腐食

注3)：塗膜剥離後の錆重量より腐食速度を求めた結果

## 6. まとめ

### 6. 1 鋼管杭の腐食環境特性(千葉沖曝露試験結果との比較)

海洋環境下の鋼管杭は、海水面に対する鉛直方向の腐食環境として、海洋大気－飛沫部－干満部上部－干満部下部－海中部－海土中部の部位から構成される。今回の阿字ヶ浦沖 22 年曝露試験と前回の千葉沖 11 年曝露の試験における腐食プロフィールを図 2.5-1 に示す。

千葉沖の腐食速度は、飛沫部で平均腐食速度が最大値(0.3~0.4mm/yr)をとり、干満部で極小値(0.03~0.04mm/yr)をとる海洋環境の典型的な腐食プロフィールをとるのに対し、阿字ヶ浦沖の腐食は、飛沫部で最大値(0.22~0.39mm/yr)をとるが、干満部より下では、ほぼ一定の腐食(0.039~0.067mm/yr)を示し、千葉沖の腐食より小さいのが特徴的である。全体的に阿字ヶ浦沖の平均腐食が千葉沖よりも小さかったのは、両者の曝露期間が異なる事、波浪が大きく干満部以下は常に海水に濡れた状態であること、すなわち阿字ヶ浦沖では、通常の海洋環境で見られる干満部の乾湿くり返しが存在しないと考えられ、干満部が海中部に極めて近い腐食環境であったと推定される。そのため干満部と海中部のマクロセルも形成されず、海中の腐食速度は減少したものと推定される。海底付近の漂砂による腐食摩耗については、裸杭に装着したガードリングの防護効果により杭自体には直接影響されなかったと推定される。すなわち海中部のガードリング鞘管の腐食量は、飛沫部のそれに匹敵する程の大きさであり、このため裸杭を保護したものと考えられる。

### 6. 2 防食鋼管杭の耐久性

#### (1) 外観観察結果による耐久性評価

外観観察を A~E の 5 段階とし、C 以下は長期耐久性を期待できないとして評価した<sup>1)</sup>。阿字ヶ浦沖、千葉沖の外観観察結果の経年変化を図 2.6-1 に示す。ただし、防食被覆系の外観観察結果は、防食層そのものの防食性能からくる劣化と施工傷、曝露期間中の漂流物の衝突傷から発生する傷に起因する防食性能の低下がある。したがって、目視による A~E の 5 段階の評価のみならず、その劣化が何に起因するかを把握することが重要である。前述の報告書には、施工傷 11 年目での目視観察結果が記述されている。この調査内容を加えて今回の外観観察結果に考察を加えた。

阿字ヶ浦沖で曝露した材料の評価は、ポリエチレン押し出し(粘着剤仕様)やポリウレタンゴムライニングが A~A/B ランク、無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料は B ランク、無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロスは B ランク、セメントモルタルライニング+ポリエステル FRP カバーは D ランク、アルミニウム溶射+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロスは E ランクであった。

#### (a) ポリエチレン押し出しライニング(4mm)(粘着剤仕様)

干満部にはく離が認められるが、これは 11 年目の観察におけるチェーンによる傷部が広がったものと推定され、その後補修も施されなかった事から特に被覆層の経年劣化ではなく、激しい波浪の影響などにより広がったと考えられる。

#### (b) ポリウレタンゴムライニング(7mm)

飛沫部、干満部の一部に表層のポリウレタンゴム層がはく離しているのが観察されているが、これは打設時の傷としてはく離が観察されておりその後特に補修がなされなかったため、11 年目にこのはく離層が広がっていることが報告されている。22 年目の調査でもこの傷が波浪のなどにより拡大したものと考えられる。

#### (c) 無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+タールエポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)

打設時に傷の発生が認められ、11 年目の観察でも、スパイラルブード近傍の傷から錆が発生し、周辺塗膜の脱落が観察されている。したがって、錆発生の大部分はこの傷部が原因と考えられる。

(d)無機ジンクリッチペイント(75 $\mu$ m)+エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m $\times$ 3)+ガラスクロス

打設時にはすり傷程度で問題なかった。塗膜のチョーキングを除けば、傷が少なく良好である。

(e)セメントモルタルライニング(47mm)+ポリエステルFRPカバー(3mm)

打設時には傷は認められていない。11年目ではFRPカバーの一部脱落、損傷が報告されている。

11年経過後の2地域の比較では、総合的には千葉沖の方が劣化は進んでいたが、これは千葉沖の方が裸鋼管杭の腐食速度が大きかった傾向と一致しており、腐食環境が厳しいほど外観評価が劣ると言える。

特に塗装系や有機ライニング系でも打設時の傷の発生や、漂流物の衝撃などにより、クラックやはく離等の欠陥が生じやすく、この欠陥部分における腐食が起りやすい環境ほど防食性能の劣化も早いと考えることができる。

すなわち、これら比較的優れた防食被覆系の防食性の喪失は、施工傷、漂流物の打撃傷などを起点に発生し、腐食環境と波浪の作用などによってその進行速度が決定されると考えられる。

(2)各防食被覆鋼管杭の詳細調査から得られた耐久性評価

(a)耐海水鋼(Cr-Al系)(6mm)巻き鋼管杭

耐海水鋼被覆材の肉厚減少状況を図2.5-2に示す。阿字ヶ浦沖の耐海水鋼の腐食傾向は、飛沫部、干満部上部では、炭素鋼の腐食速度と同程度に大きく22年目では貫通孔を生じた。また、干満部下部以下では、炭素鋼より腐食が小さく、耐海水性を示すとともに素地鋼管杭への防食効果が認められた。(貫通孔部は除く)

阿字ヶ浦沖は、千葉沖と各環境部位で、同程度ないしはやや小さい腐食速度を示した。

なお、今回の耐海水鋼は、4Cr-0.4Al-0.2Mo-0.2Cu系であり、耐海水性能は海水中で発揮されたが、飛沫部では発揮されていない。(本防食系では、飛沫部に有機被覆系を併用することにより、より長い防食寿命が期待できる。)耐海水鋼被覆下の鋼素地面の腐食は、飛沫部の一部を除いてほとんど進行しておらず、被覆面には一定の防食効果が認められる。ただし、耐海水鋼と炭素鋼の異種金属接触腐食を防止する点から、海中部においては、素地鋼管面を完全に耐海水鋼で覆うか、電気防食法の併用あるいは、素地鋼管との絶縁を完全に行う必要があると考えられる。

(b)塗装鋼管杭

無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料や無機ジンクリッチペイント+エポキシ樹脂塗料+ガラスクロス防食鋼管杭は、外観からは全体的にBランクであった。後者が干満部での漂流物の衝突と推定される損傷や生物の付着痕からの発錆がほとんどなく、前者に比べて良好であった。ガラスクロス補強が効果を表したと考えられる。また千葉沖と比較しても特性に大きな変化はない。ただし、ガラスクロスと塗膜の付着に関しては、接着強度測定時において、ガラスクロスと塗膜の層間にはく離の傾向が強く、ガラスクロスと塗膜密着性を考慮した、ガラスクロスの網目の選択または下地処理などを施すことがより好ましいと考えられる。

無機ジンクリッチペイント+タールエポキシ樹脂塗料防食鋼管杭は、漂流物や付着生物による塗膜損傷があった。相対的に塗膜の損傷を受けやすい被覆系である。塗膜をはく離して観察したところ、素地には点錆が観察されたが、塗膜自体は塗膜の電気抵抗値が $10^6\Omega$ 以上あり高い絶縁性を示しており、これは傷のない所では塗膜のバリア効果が防食性に十分寄与していることを示す。千葉沖と比較しても特性に大きな変化はない。

(c)無機ライニング防食鋼管杭

無機ライニングとしてセメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭があり、外観評価ではC~Dランクであった。(本評価は、主にFRPカバーの脱落に起因する。)

セメントモルタルライニング+ポリエステルFRPカバー鋼管杭では、FRPカバーが損傷はく離し

た部位で鉄筋の腐食が起こり、セメントモルタルが離脱して鋼管杭の腐食が進行する事実が明らかになった。阿字ヶ浦沖の激しい波浪などによって、2本ともにFRPカバーの脱落が観察されたが、これらの衝撃に耐えうるようなFRPカバーの厚み、取り付けの固着方法の改善が必要である。

#### (d)有機ライニング鋼管杭

ポリウレタンゴムライニング鋼管杭は一部飛沫・干満部域で被覆層にポリウレタン2層被覆間の層間にはく離(施工傷が原因で激しい波浪の影響などで広がったと推定。)や層間にはく離後の被膜下に錆発生部位があったが、被覆をはく離して観察したところ、鋼素地の腐食は起こっていなかった。残存被膜の物性には異常が認められず、鋼素地に腐食が生じていないことから被膜の防食性能は十分確保されていると考えられる。なお、現状のポリウレタン被覆層は、耐衝撃性、耐久性が改良されたポリウレタンエラストマーが使用されており、現状での各地の曝露結果では、評価はAランクで問題ないと評価されている(表2.6-1参照)。

ポリエチレン押し出しライニング(粘着剤仕様)鋼管杭も、一部曝露初期に干満部で、外力で損傷した部位が見られ、一部被膜下で腐食の進行が認められた。これらは傷部より毛管現象や粘着剤の変質に伴う粘着特性の喪失により起きたものと考えられる。この傷部より発生した腐食の腐食速度は0.0001mm/yr程度と小さく、十分な防食性能を有していると推定される。

本曝露試験に使用された粘着剤は、原油を精製した後に残るアスファルトに樹脂を混ぜた物質であり、時間とともに揮発分が無くなると固くなり粘着性が低下する欠点を有している。したがって、粘着剤仕様のポリエチレン被覆の接着強度の低下は被覆上、下端が防水処理を施していないため、アスファルトの揮発性を促進したとともに、粘着力の喪失により比較的溫度差の大きい干満～飛沫～大気部においてアスファルト系ゴム接着剤の付着力が低下したためと推定される。また、千葉沖と比較しても被膜物性など特性に大きな変化はなく、接着系が十分な止水効果を有するならばより長い防食寿命が期待できる。

ポリエチレン押し出し被覆系も現在では、付着力、耐久性を改善したポリエチレン接着剤を使用した接着仕様が主力になっている。本仕様は、表面処理した鋼面にエポキシ系プライマーを塗布し、ポリエチレンを一部変性して接着性を付与した変性ポリエチレンを使用しており、変性ポリエチレンとエポキシプライマーが化学的に結合する。この両層間は強固な共有結合が存在することが報告<sup>2)</sup>されており、ポリエチレン層と接着性を付与した変性ポリエチレンは熱融着され、互いにポリエチレンが混ざりあって一体化する。このような現状の接着剤使用については、阿字ヶ浦沖曝露試験結果同様に各地の曝露試験でも優れた耐久性を示している。(表2.6-1参照)

最後に表2.6-2において、千葉沖(11年曝露)、阿字ヶ浦沖(22年曝露)の飛沫部、干満部の評価結果(あきらかな施工傷部などを除外する。)を示した。全体的に11年後と22年後の結果は、ほぼ同様な結果が得られた。ただし、被覆系によっては打設時の傷や曝露期間中の漂流物による傷に起因する劣化部位が、劣化の主要原因となっているものも見受けられ、特に施工時の傷をできるだけ避けることが、これら防食被覆の寿命を延ばす要因の一つと考えられる。とくにポリエチレン押し出しライニング(粘着剤仕様)、ポリウレタンゴムライニング、タールエポキシ樹脂塗料系については、傷部がなければほぼ完全に25年以上の防食能力を有すると推定される。ただし、施工傷は阿字ヶ浦沖のような波浪の激しい環境では進行するおそれがあるので、傷部は早期に適正な方法で補修することが、防食性能を維持する上では重要である。

千葉沖、阿字ヶ浦沖とも曝露期間の差はあるものの、内湾環境でも外海環境でも防食性に優れた材料は厚膜タイプのライニング被覆系であった。

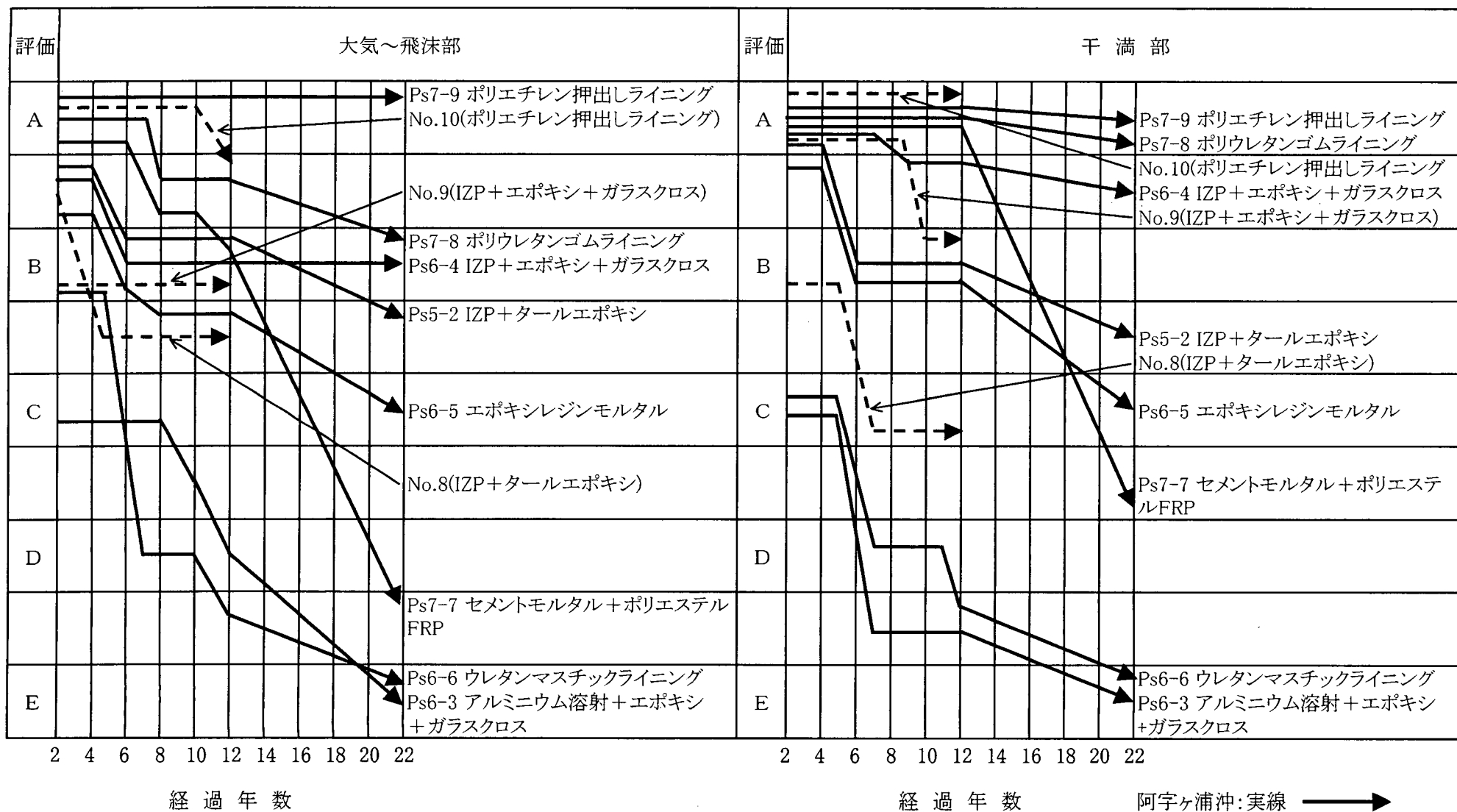


図2.6-1 防食鋼管杭暴露試験観察結果

表2.6-1 有機ライニングの長期曝露試験一覧表

| 曝露試験の名称                                                   | 機 関                                           | 場 所               | 期 間                            | 耐久性評価                |                      |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                           |                                               |                   |                                | ポ <sup>○</sup> リエチレン | ポ <sup>○</sup> リウレタン |
| 防食鋼管杭の開発とその海洋曝露試験 <sup>1)</sup>                           | ・建設省土木研究所<br>・(財)国土開発技術<br>研究センター<br>・鋼管杭協会   | ・千葉沖              | 1975<br>～1998                  | 粘着剤仕様<br>A 11年       |                      |
|                                                           |                                               | ・阿字ヶ浦沖            | 1976<br>～1997                  | 粘着剤仕様<br>A 22年       | ウレタンゴム<br>A 22年      |
| 横浜市本牧ふ頭における<br>ウレタンエラストマー被覆重防食<br>鋼管の海洋曝露試験 <sup>3)</sup> | ・横浜市港湾局<br>・NKK<br>・(株)クボタ                    | ・横浜市/本牧<br>ふ頭C突堤  | 1987<br>～1997                  | —                    | ウレタンエラストマー<br>A 10年  |
| 鋼管杭の防食法に関する<br>研究 <sup>4)</sup>                           | ・運輸省港湾技術研究所<br>・(財)沿岸開発技術研究<br>センター<br>・鋼管杭協会 | ・波崎沖              | 1984<br>～2004                  | 接着剤仕様<br>A 15年       | —                    |
| 熱帯海域における鋼材と<br>防食材の曝露試験 <sup>5)</sup>                     | ・鋼管杭協会                                        | ・シンガポール<br>・フィリピン | 1983<br>～1997<br>フィリピンは<br>継続中 | 接着剤仕様<br>A 15年       | —                    |
| 海洋構造物の耐久性<br>向上に関する共同研究<br>第一分科会 <sup>6)</sup>            | ・建設省土木研究所<br>・(社)鋼材倶楽部                        | ・駿河湾沖             | 1984<br>～2004                  | 接着剤仕様<br>A 14年       | —                    |

参考文献（巻末に添付する）

評価ランクはA～EでC以下は長期耐久性なしと判定

#### 参考文献

- 1) 鋼管杭協会：「防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書」(1992)
- 2) 遠藤：「材料とプロセス」CAMPISIJ Vol.8(1995)-1541
- 3) 伊坂健二，鈴木 操，土谷正幸，鈴木規彦：土木学会第48回年次学術講演会 V-120, (1993)
- 4) 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)
- 5) 鋼管杭協会：「熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験－暴露10年間の結果報告－」(1997)
- 6) 建設省土木研究所，(社)鋼材倶楽部，(社)プレスト・コンクリート建設業協会，(財)土木研究センター：「海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書」(1990)

## 第3編 既設鋼管杭における防食被覆の調査

### 1. 調査概要

#### 1. 1 調査目的

調査の対象となった既設鋼管杭は、昭和47年(1972)度に、茨城県ひたちなか市阿字ヶ浦海岸に漂砂の観測施設として設置された栈橋(長さ96.9m)の鋼管杭支柱である。栈橋の鋼管杭は、防食被覆を施してなかったため腐食の進行が著しく、昭和51年(1976)8月に各種の仕様で防食被覆を施すことになり、事前調査として鋼管の肉厚計測を行ったところ、設置後ほぼ4年間で平均約1mmの肉厚減少と最大4.8mmの孔食が認められた。

栈橋の鋼管杭への各種防食被覆の施工は、種々の防食仕様で実施され、被覆の耐久性に影響する施工上の貴重な資料が得られた。また、防食被覆の劣化状況についても、施工後4年間にわたる追跡調査と22年供用後の鋼管杭引抜き時に詳細調査が行われ、長期の防食に適性のある現地での補修方法の選定に役立つ資料が得られた。

第3編では、22年経過した防食被覆の詳細調査結果について報告する。

本調査は、漂砂観測施設の鋼管杭支柱を防食するための現地防食施工と防食被覆の追跡調査を行うことにより、各種防食被覆の補修方法を明らかにする目的で行ったものである。

なお、防食被覆の現地施工時には、海象および気象条件、素地調整に採用した工法(ハンマーリング後、インヒビター添加水道水と研掃材として珪砂を用いるウエットブラスト工法)の施工条件、諸材料の使用量被覆種類別施工方法と施工時間、作業者人工等、施工費の積算に必要な記録をとった。また、施工後4年間にわたり実施した追跡調査では、被覆の防食性や耐久性との関連で、ウエットブラスト工法の有効性について調査するとともに、施工時の環境条件が被覆の耐久性におよぼす影響、被覆が接する環境条件と被覆の耐久性の関係、被覆の耐久性と被覆の厚みの関係、干満部塗装時における波浪による塗料の流出対策など、飛沫部や干満部の防食に適した防食仕様の選定および防食施工時の留意点に関する資料を得た。調査結果の詳細は、工事記録については、鋼橋塗装Vol.5, No.1『阿字ヶ浦漂砂観測用栈橋鋼管杭防食工事』、追跡調査結果については、鋼橋塗装Vol.8, No.4『既設鋼管杭に現場施工した各種防食被覆の耐久性に関する調査』を参照されたい。

#### 1. 2 調査内容

##### (1) 防食被覆の仕様および防食範囲

本調査の実施に先立ち、平成8年(1996)度に全鋼管杭の防食被覆の現況調査を行い、調査する価値の有無を判断した。調査する価値ありと評価され、今回の調査対象となった現地施工防食被覆の仕様を表3.1-1に、形状および防食範囲を図3.1-1に示す。

表3. 1-1 現地で補修施工した既設鋼管杭の詳細調査対象防食被覆仕様および施工方法

| ピアNo. | 鋼管杭No. | 飛沫部                                                                          | 干満部                                             |                                                                                                                 |                                                                                         |
|-------|--------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|       |        | T. P. + 4 ～ + 2                                                              | T. P. + 2 ～ + 1. 5                              | T. P. + 1. 5 ～ + 1                                                                                              | T. P. + 1 ～ ± 0<br>2次防食(昭和56年 7 月)                                                      |
| Ps 1  | ⑤      | エポキシ樹脂塗料<br>+厚膜型エポキシ<br>樹脂塗料× 2<br>(440 μ m)<br>第 1 層；はけ塗り<br>その他；エアレス<br>塗装 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B<br>( 5 mm)<br>手塗り（押さえ用具使用）       |                                                                                                                 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>( 2 mm) + F R Pカバー<br>(2. 5mm)<br>(T. P. +0. 5まで)<br>手巻き    |
|       | ⑥      | 有機ジンクリッチ<br>ペイント+厚膜型<br>エポキシ樹脂塗料<br>× 2 (415 μ m)<br>エアレス塗装                  |                                                 |                                                                                                                 |                                                                                         |
| Ps 2  | ⑦      | 変性エポキシ樹脂<br>塗料× 3 (390 μ m)<br>エアレス塗装                                        |                                                 |                                                                                                                 | ペトロラタムペースト（手塗り）+ペトロラタムテープ<br>（2 mm手巻き）+ E P Tカバー（2 mm）<br>昭和56年 7 月 F R Pカバー（2. 5mm）と交換 |
|       | ⑧      |                                                                              |                                                 |                                                                                                                 |                                                                                         |
| Ps 3  | ⑪      | ガラスフレーク入<br>りポリエステル樹<br>脂塗料（1000 μ m）<br>圧送式エアスプレ<br>ー塗装                     | 水中硬化型エポ<br>キシ樹脂塗料+<br>ガラスクロス<br>( 5 mm)<br>こて塗り | ペトロラタムペー<br>スト（手塗り）+<br>ペトロラタムテー<br>プ（2 mm手巻き）<br>+ E P Tカバー<br>( 2 mm)<br>昭和56年 7 月<br>F R Pカバー<br>(2. 5mm）と交換 |                                                                                         |
|       | ⑫      | 無溶剤型厚膜型タ<br>ールエポキシ樹脂<br>塗料（500 μ m）<br>エアレス塗装                                |                                                 |                                                                                                                 |                                                                                         |
| Ps 4  | ⑬      | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラ<br>スクロス<br>こて塗り                                            |                                                 |                                                                                                                 |                                                                                         |

(注) ・素地調整：ウエットブラスト工法によりSa 2 まで除錆

・E P T：エチレン・プロピレンターポリマー

・F R P：繊維補強プラスチック

・2次防食：昭和56年(1981) 7月、E P TカバーをF R Pカバーと替えた時に、その下方T. P. ±0. 0m  
まで新たに防食施工したことを言う

・被覆の厚みは、補修仕様の厚みを示す

・ペトロラタムテープの厚みは、ペトロラタムペーストの厚みを含む

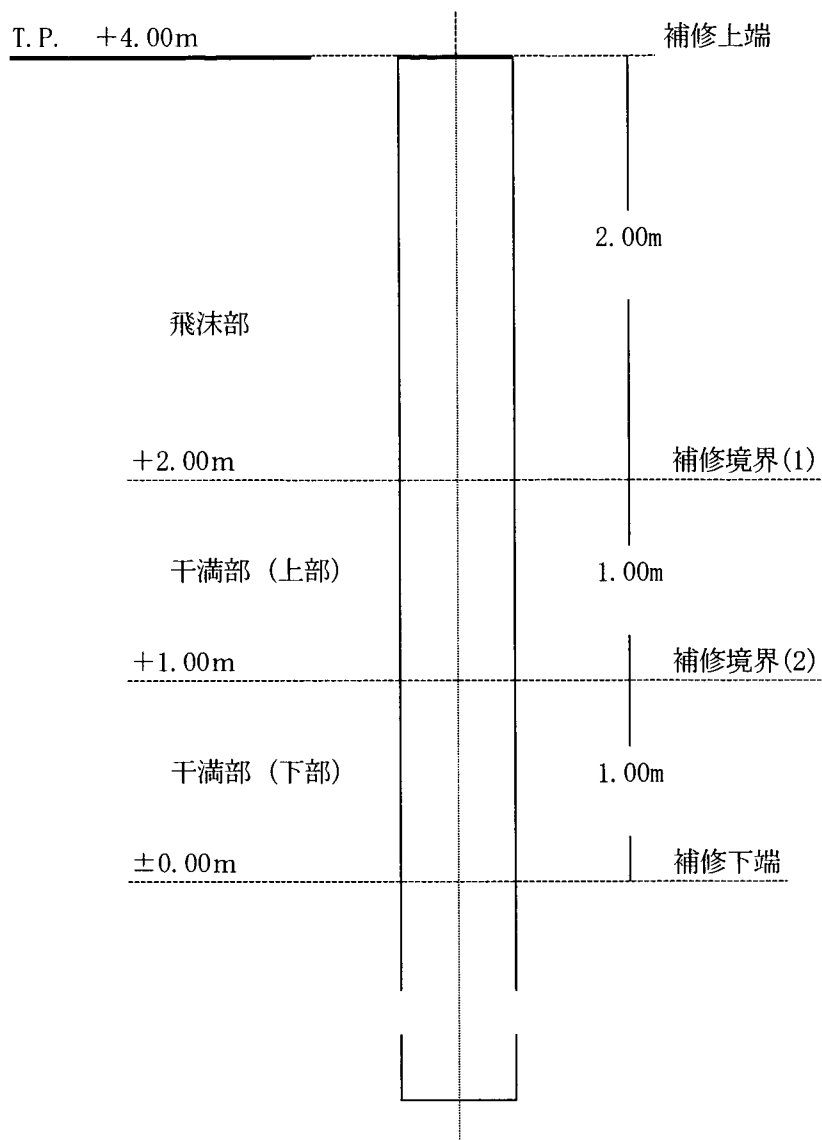


図3.1-1 鋼管杭の形状および防食範囲

## (2) 鋼管杭の配列

鋼管杭の配列を図3.1-2に示す。

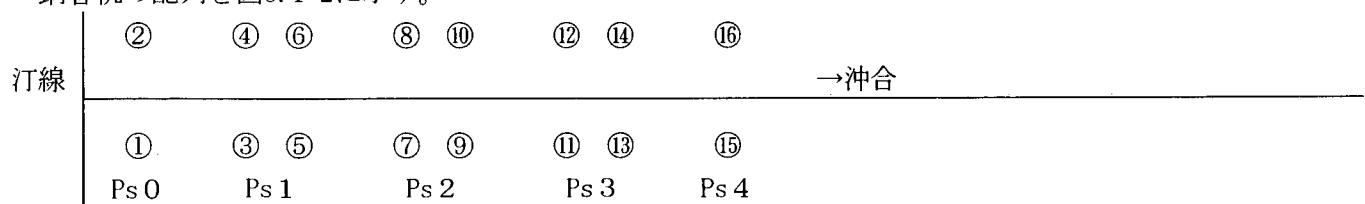


図3.1-2 鋼管杭の配列

(3) 調査項目

現地で防食被覆を施工した鋼管杭の調査は、表3.1-2の項目について行った。

表3.1-2 調査項目

| 調査場所  | 調査試験等項目            | 調査試験対象杭等                 |
|-------|--------------------|--------------------------|
| 現 地   | 生物付着状況観察、スケッチ、写真撮影 | 全杭                       |
|       | 被覆の外観観察、スケッチ、写真撮影  | 全杭                       |
|       | 鋼管の厚さ測定            | Ps0 No.1, Ps 2 No.8 杭の下部 |
| つ く ば | 被覆の厚さ測定            | 詳細調査対象杭                  |
|       | 被覆の付着力測定           | 詳細調査対象杭                  |
|       | 被覆のはく離調査、写真撮影      | 詳細調査対象杭                  |
| 実 験 室 | 引張試験               | Ps 2 No.8 杭のFRP保護カバー     |
|       | 曲げ試験               | Ps 2 No.8 杭のFRP保護カバー     |
|       | 絶縁抵抗試験             | Ps 2 No.8 杭のペトロラタムペースト   |

## 2. 調査方法

現地で施工した防食被覆の調査は、まず、引抜き前に（杭頭部へのナンバーリング、方位のマーキング）を行ってから、引抜き後、現地での調査として（生物付着状況観察、スケッチ、写真記録）→（付着生物の除去および清掃）→（被覆の劣化状況外観観察、スケッチ、写真記録）→（鋼管杭の肉厚測定）→（鋼管杭の切断箇所へのマーキング、切断、搬出）を行った。次いで、つくばにおける（被覆の厚さと付着力の測定、被覆のはく離調査）→実験室における（FRPカバーから採取した試験片の引張試験、曲げ試験、ペトロラタムの絶縁抵抗試験）→（調査結果整理）という順序で行った。

各調査試験の内容および方法は、以下のとおりである。

### 2. 1 引抜き前の調査

杭を引抜く前に、調査対象鋼管杭の確認および杭番号や方位のマーキングを行った。

### 2. 2 引抜き後の調査

杭の引抜き後に、現地で以下の調査を行った。

（1）生物付着状況の外観観察、スケッチおよび写真撮影

（2）付着生物の除去および清掃

（3）被覆はく離前の防食被覆の劣化状況外観観察、スケッチおよび写真撮影

防食被覆はく離前の外観観察は、被覆の種類別に表3. 2-1の項目について行った。

表3. 2-1 外観観察項目

| 防 食 被 覆 の 種 類                           | 観 察 項 目                     |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| エポキシ樹脂塗料下塗り＋厚膜型エポキシ樹脂塗料×2               | さび、はがれ、われ、ふくれ等              |
| 有機ジンクリッチプライマー＋厚膜型エポキシ樹脂塗料×2             | 同上                          |
| 変性エポキシ樹脂塗料×3                            | 〃                           |
| ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料                     | 〃                           |
| 無溶剤型厚膜タールエポキシ樹脂塗料                       | 〃                           |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B                          | さび、はがれ、われ、ふくれ、浮き、           |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D＋＋ガラスクロス                  | 同上                          |
| ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ（2mm）＋FRPカバー（2.5mm） | FRPカバーの損傷や緩み、ずれ、ボルトの脱落および損傷 |

#### (4) スケッチ

付着生物除去前、除去後の防食被覆の外観は、所定の様式に基づき、展開図を作成し、それにスケッチした。

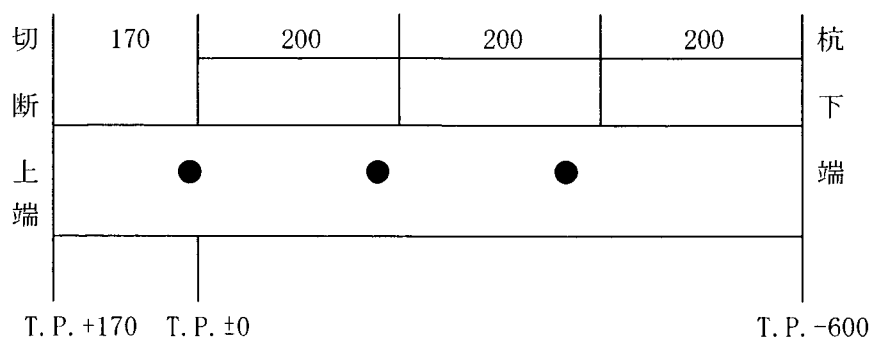
#### (5) 鋼管杭の肉厚測定

目視観察に引き続き、鋼管杭の腐食による肉厚の減少量と電気防食の効果を調べる目的で、超音波厚さ計(UDM-750型)を用いて肉厚を測定した。

測定は、陸上にあるPs 0のNo.1杭(基準とする)とアルミニウム合金陽極を取り付けたPs 2のNo.8杭を選んで行った。肉厚測定位置を図3.2-1に示す。

測定は、1箇所について測定点を5点とり、各点でそれぞれ3回の測定を行い、計15回の平均値をもって各測定箇所の値とする方法で行った。

Ps 0 No.1杭(比較用杭:陸上部の杭 L=770) (単位:cm)



Ps 2 No.8杭(電気防食適用杭 L=860)

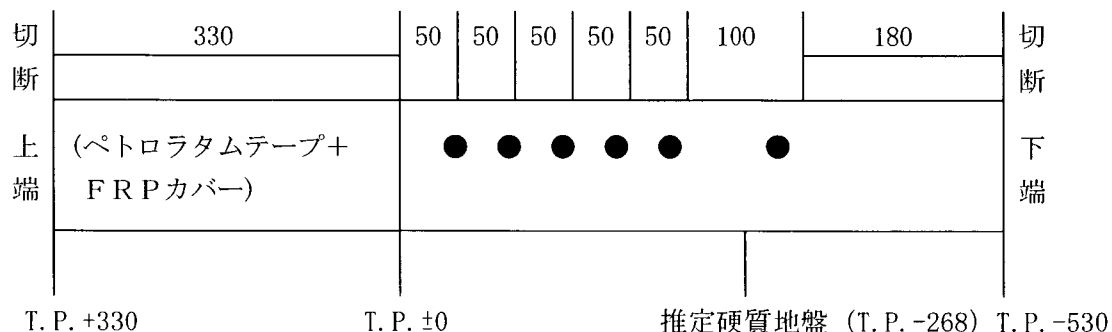


図3.2-1 肉厚測定位置

(6) 調査項目別に、写真記録をとった。

(7) 切り取り箇所のマーキング

調査対象鋼管杭の、切り取り箇所のマーキングは、被覆の種類別境界が分かるように行った。

## 2. 3 切り取り試験体の調査

(1) つくばでの調査

①被覆の厚み測定

②被覆の付着力測定

③被覆のはく離調査：被覆のはく離後に、鋼管杭の表面の発錆状況を観察し、写真を撮影した。

(2) 実験室での調査試験

FRPカバーを取り外して、ペトロラタムテープの緩み、ずれ等を観察してから、テープをはく離し鋼索地からの発錆の有無や発錆程度を観察評価した。FRPカバーについては、引張強さ試験と曲げ強さ試験を行い、強度の変化から劣化の程度を調べた。ペトロラタムについては、交流インピーダンス法による絶縁抵抗試験を行って劣化の程度を調べた。

### 3. 調査結果および考察

#### 3. 1 生物付着状況調査結果

現地で行った生物の付着状況調査結果を図3. 3-1(1)~(7)に示す。この調査結果からは、陸側と海側 とでは波浪が直接当たる海側の方が生物の付着がやや少ないように見受けられるが、判然とした差異は認められなかった。

#### 3. 2 目視観察結果

調査対象鋼管杭を含む全ての鋼管杭の被覆の劣化状況を、目視により観察した結果は、以下のとおりである。なお、詳細調査対象杭の観察スケッチを図3. 3-1(1)~(7)に示す。

##### (1) Ps O・No. 1 杭 (有機ジンクリッチプライマー+厚膜型ビニル樹脂塗料 ; 275 $\mu$ m) (水中硬化型エポキシ樹脂塗料 A ; 5 mm)

全長10mの杭の頭部をT. P. +170cm位置で切断し、海岸の硬質地盤層T. P. -6mまで根入れされていた杭を、バイプロハンマで引き抜いた。引抜き長は770cmであった。

鋼管杭外面の防食被覆は、はく離が著しく全面がさび瘤で覆われていた。鋼管杭の内面は、閉塞状態の土砂で充填されており、硬質地盤のシルト分が目視できる状態であった。鋼管杭内面の腐食は、薄い均一なさびが見られただけで腐食の進行は認められなかった。被覆のない根入れ部の鋼管外面は、シームラインを含めて腐食の形跡が明瞭でなく、腐食は軽微と判断した。肉厚の測定結果については後で記述する。

##### (2) Ps O・No. 2 杭 (有機ジンクリッチプライマー+厚膜型ビニル樹脂塗料 ; 275 $\mu$ m) (水中硬化型エポキシ樹脂塗料 A ; 5 mm)

防食被覆のはく離が著しく、全面がさび瘤で覆われていた。

##### (3) Ps 1・No. 3 杭 (無溶剤型エポキシ樹脂塗料+ポリウレタン樹脂塗料 ; 330 $\mu$ m) (水中硬化型エポキシ樹脂塗料 A ; 5 mm)

全長14mの杭の頭部はT. P. +355cmの位置で切断し、海底土中根入れ部は、水中カッターで切断し引き抜いた引抜き長は778cmであった。

上部、下部ともに防食被覆の残存は認められるが、さび瘤が多く被覆の防食機能は完全に失われている状態であった。

##### (4) Ps 1・No. 4 杭 (変性エポキシ樹脂塗料+エポキシ樹脂塗料 ; 300 $\mu$ m) (水中硬化型エポキシ樹脂塗料 A ; 5 mm)

全長14mの杭の頭部はT. P. +355cmの位置で切断し、海底土中根入れ部は、水中カッターで切断し引き抜いた引抜き長は778cmであった。

上部、下部ともに、防食被覆の残存は認められるが、さび瘤が多く被覆の防食機能は完全に失われている状態であった。

##### (5) Ps 1・No. 5 杭 (エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 ; 440 $\mu$ m) (水中硬化型エポキシ樹脂塗料 B ; 5 mm)

(ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm)+(FRPカバー2.5mm) ; T. P. +0.5mまで

全長14mの杭の頭部はT. P. +355cmの位置で切断し、海底土中根入れ部は、水中カッターで切断し引き抜いた引抜き長は778cmであった。

当初は、E P T ゴムシートのカバーが取り付けられていたが、上部、下部の劣化とボルトの緩みでずり落ちて砂中に埋まっていたのを、昭和56年(1981) 7月にF R Pカバーと交換したものである。上部の防食被覆は、さびによるふくれが多く防食効果はかなり低下していると判断される状態であった。下部の水中硬化型エポキシ樹脂塗料は、海側の被覆がはく離しているが、これは施工直後に波浪によりはがれたものである。

最下部のペトロラタムテープ+ F R Pカバーは、ペトロラタムテープの痕跡は残っていたが、F R Pカバーは残っていなかった。

(6) Ps 1・No.6 杭(有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料; 415 $\mu$ m)

(水中硬化型エポキシ樹脂塗料B; 5mm)

(ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm)+(F R Pカバー2.5mm); T. P. +0.5mまで

全長14mの杭の頭部はT. P. +355cmの位置で切断し、海底土中根入れ部は、水中カッターで切断し引き抜いた引抜き長は777cmであった。

No.5杭と同様に、上部の防食被覆は、さびによるふくれが多く防食効果はかなり低下していると判断される状態であった。下部の水中硬化型エポキシ樹脂塗料は、海側の被覆がはく離しているが、これは施工直後に波浪によりはがれたものである。

最下部のペトロラタムテープ+ F R Pカバーは、No.5杭と同様に、昭和56年(1981) 7月にE P T ゴムのカバーをF R Pカバーと交換したものであるが、劣化、損傷が著しく、ペトロラタムテープの痕跡は残っていたがF R Pカバーは残っていなかった。

(7) Ps 2・No.7 杭 (変性エポキシ樹脂塗料 $\times$ 3; 390 $\mu$ m)

(水中硬化型エポキシ樹脂塗料B; 5mm)

(ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm)+(F R Pカバー2.5mm)

全長16mの杭の頭部はT. P. +330cmの位置で切断し、海底土中根入れ部は、水中カッターで切断し引き抜いた引抜き長は822cmであった。

上部の防食被覆は、一応の防食性能を発揮しているように見受けられたが、被覆は脆くはがして見ると鋼素地全面に薄い赤錆の発生が認められた。昭和56年(1981) 7月に補修した際に交換したF R Pカバーは、外見上異常は見られなかったが、接合用ボルトが2箇所脱落しており、波浪の激しい外洋への適用には改善が必要と考えられる。

この杭とNo.8杭の間に、電気防食の目的でアルミニウム合金陽極が取り付けられていた。陽極は、ほぼ1/3程度の残量があり、電氣的に接続されていた汀線側の鋼管杭の下部には、現在まで防食電流が流れていたと考えられる。しかし、鋼管杭脚柱の間隔が20mと長いので電気防食の効果は、分極に必要な電流の供給が可能なP s 2近傍に限定されることが考えられる。

(8) Ps 2・No.8 杭 (ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm)+(F R Pカバー2.5mm)

F R Pカバーおよびクッション材を取り外し、ペトロラタムテープを目視観察したが、ペトロラタムはまだ粘りがあり十分に油分を含んだ状態を保っていた。

(9) Ps 2・No.9 杭 (変性エポキシ樹脂塗料 $\times$ 3; 390 $\mu$ m)

(ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm)+(F R Pカバー2.5mm)

上部の防食被覆には、さび瘤が発生していた。F R Pカバーには、全体的に外見上の異常は認められなか

った。

- (10) Ps 2・No.10杭 (セメントモルタル；10cm)  
(FRPカバー；3mm)

セメントモルタルを保護するFRPカバーは、セメントモルタルとともに消失していた。しかし、T.P. ± 0 m以深の鋼管杭の表面は、すぐ傍のNo.7杭とNo.8杭の間にアルミニウム合金陽極が取り付けられていたため、局部腐食の進行は認められなかった。

- (11) Ps 3・No.11杭 (ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料；1000 $\mu$ m)  
(水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋ガラスクロス；5mm)  
(ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ2mm)＋(FRPカバー2.5mm)

上部の防食被覆は、もらいさびが著しく一部にさび瘤が発生していた。下部の防食被覆は、海側に一部はく離が認められた。FRPカバーには、外見上の異常はないが接合用ボルトが2箇所脱落していた。

- (12) Ps 3・No.12杭 (無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料；500 $\mu$ m)  
(水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋ガラスクロス；5mm)  
(ペトロラタムテープ；1.5mm＋FRPカバー；2.5mm)

上部の防食被覆は、もらいさびのほかにはく離が多く素地からの腐食が著しい。下部の防食被覆は、全面はく離し素地からの腐食が著しい。FRPカバー部は、カバーが消失しペトロラタムテープも消失して鋼素地が露出していた。なお、当初の仕様では、水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋ガラスクロスを施工した部分まで、無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料を塗装する計画であったが、波浪により計画どおり施工できなかったため、上記のように仕様を変えて施工している。

- (13) Ps 3・No.13杭 (ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料；1000 $\mu$ m)  
(水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋ガラスクロス；5mm)  
(ペトロラタムテープ；1.5mm＋FRPカバー；2.5mm)

上部の防食被覆には、さび瘤の発生が認められた。下部は、防食被覆が消失していた。

- (14) Ps 3・No.14杭 (無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料；300 $\mu$ m)  
(水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋ガラスクロス；5mm)  
(ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ；2mm＋FRPカバー；2.5mm)

上部、下部ともに、防食被覆が消失していた。

- (15) Ps 4・No.15杭 (常温加硫型クロロプレンゴムシート；3mm)  
(水中硬化型エポキシ樹脂塗料C 5mm)  
(ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ；2mm＋FRPカバー；2.5mm)

上部、下部ともにFRPカバーを含めて、防食被覆は全て消失し素地から腐食していた。

- (16) Ps 4・No.16杭 (水中硬化型エポキシ樹脂塗料D＋ガラスクロス；4mm)  
(ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ；2mm＋FRPカバー；2.5mm)

上部、部ともに上部からのもらいさびが著しいが、被覆は良好な状態であった。

FRPカバー部は、外見上の異常はないが、接合用ボルトが3箇所欠落しており、波浪の激しい外洋への適用には改善が必要であることが分かった。

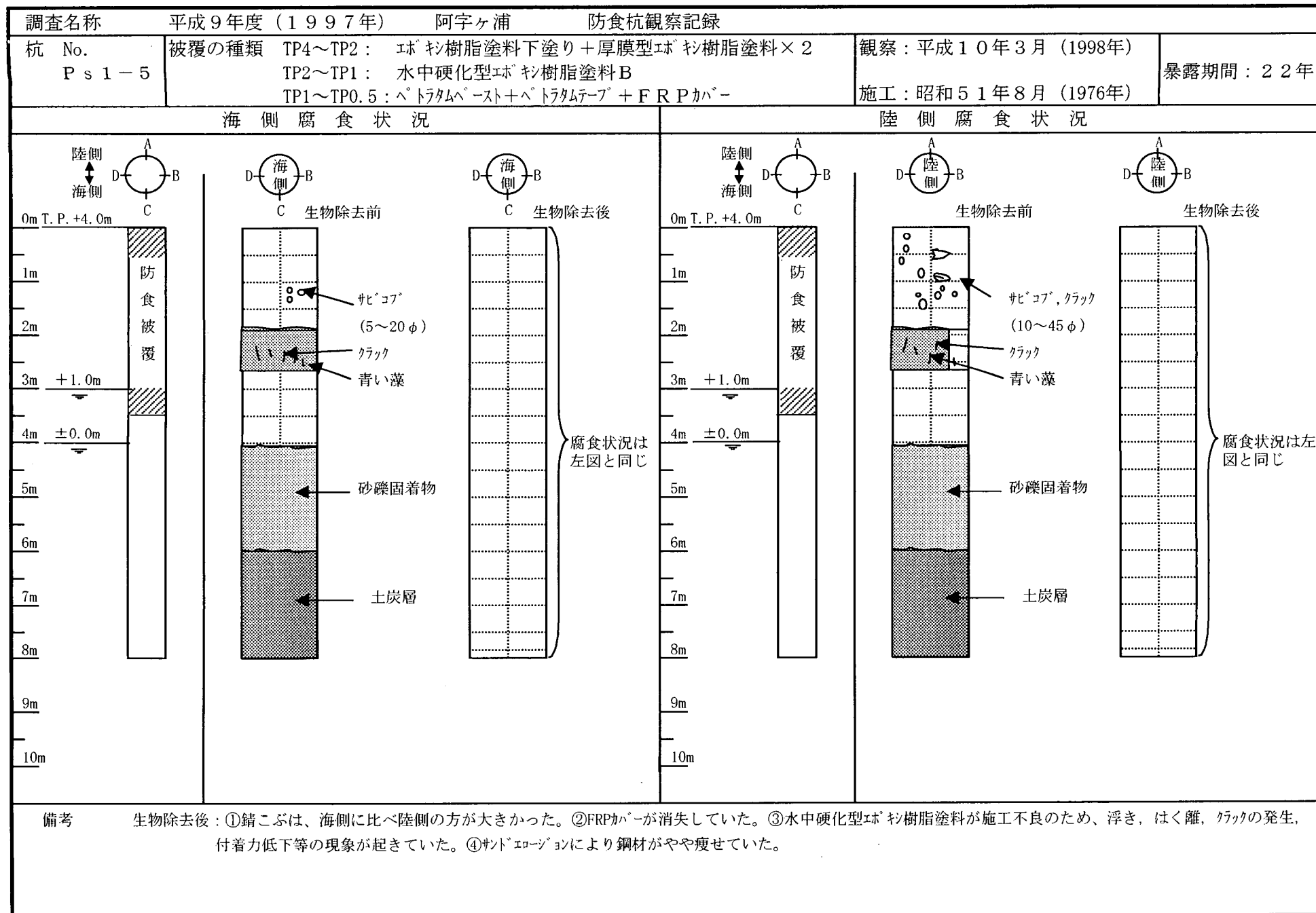


図 3.3-1 (1) 生物付着状況および被覆劣化状況

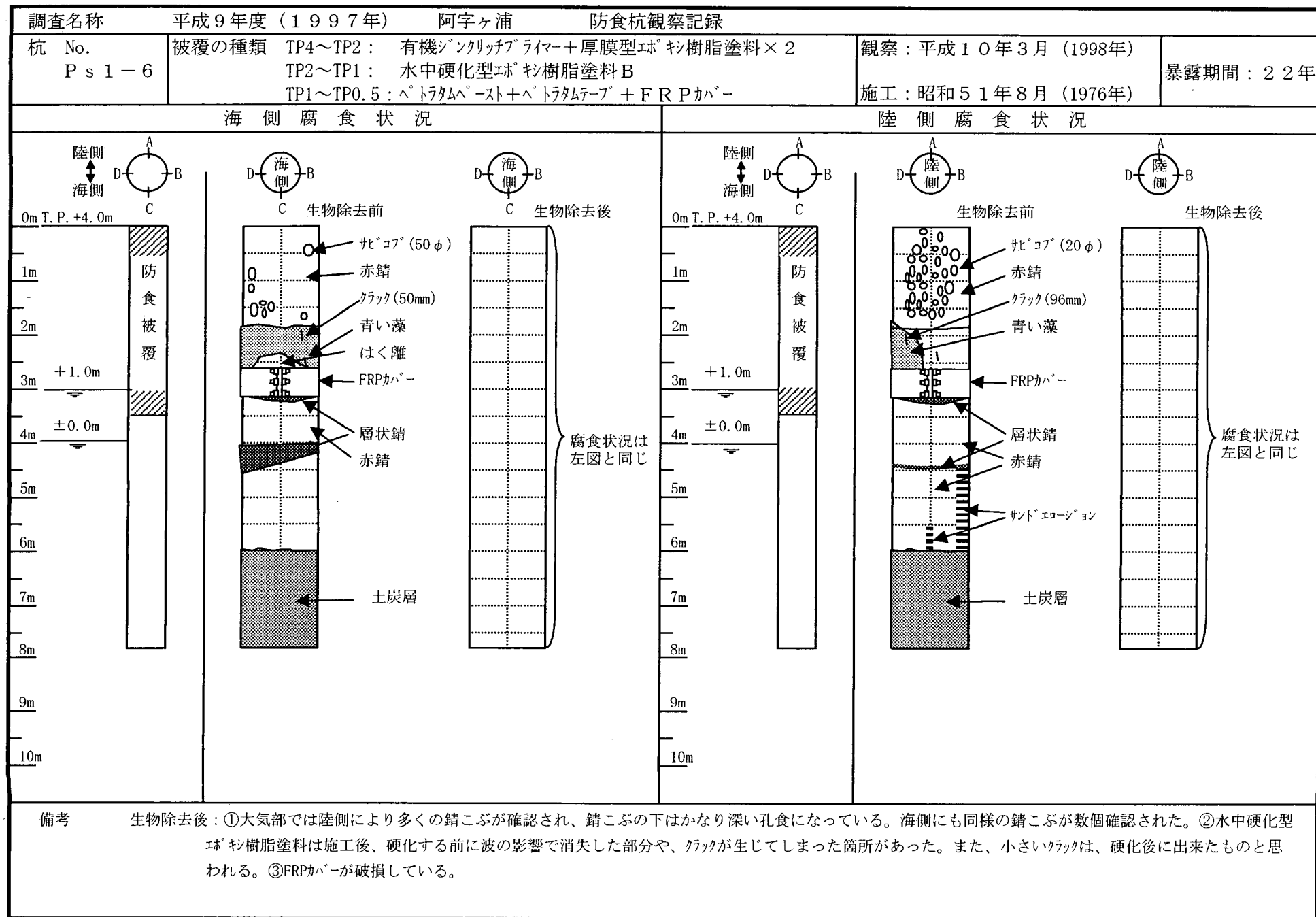


図 3.3-1 (2) 生物付着状況および被覆劣化状況

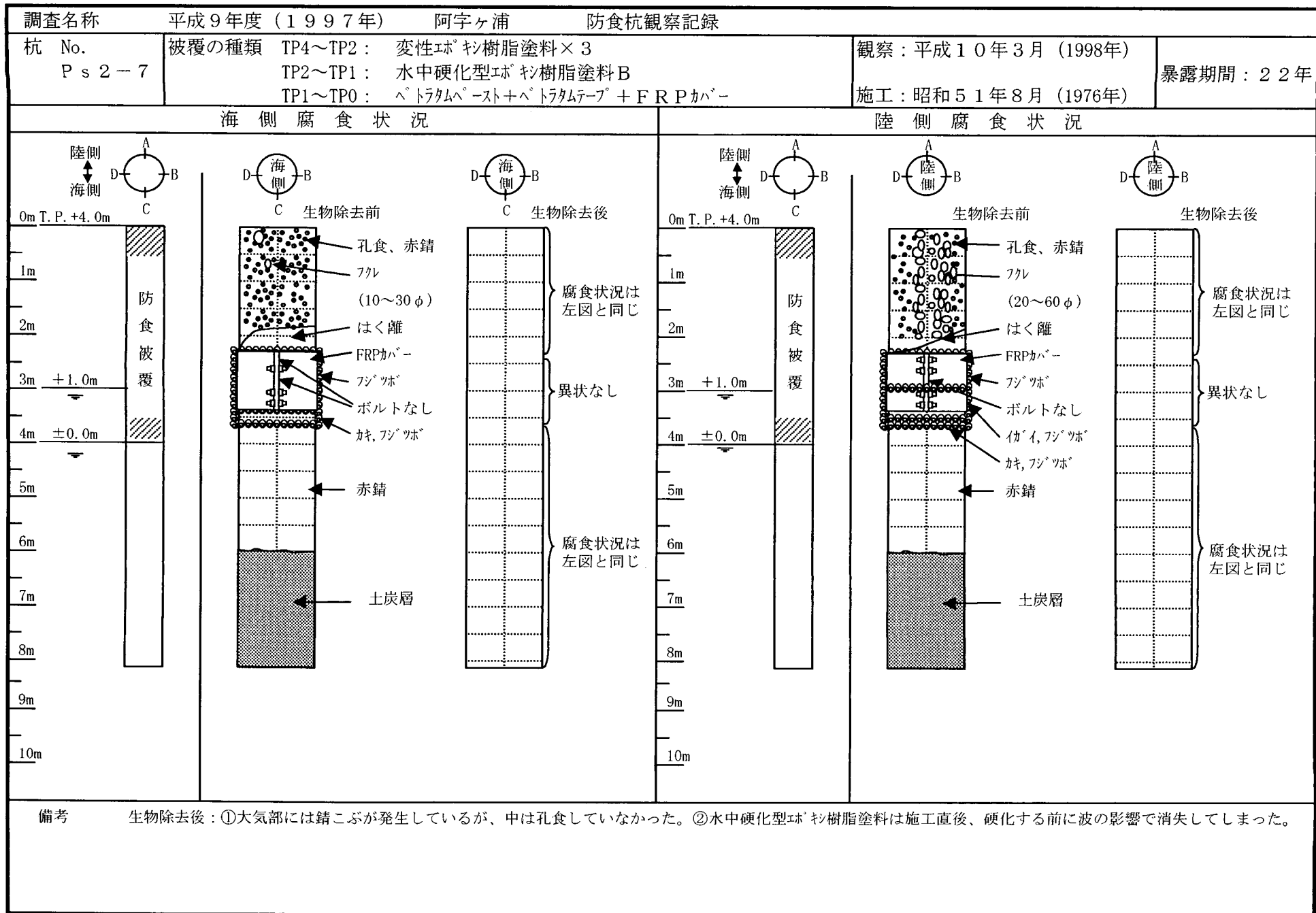


図 3.3-1 (3) 生物付着状況および被覆劣化状況

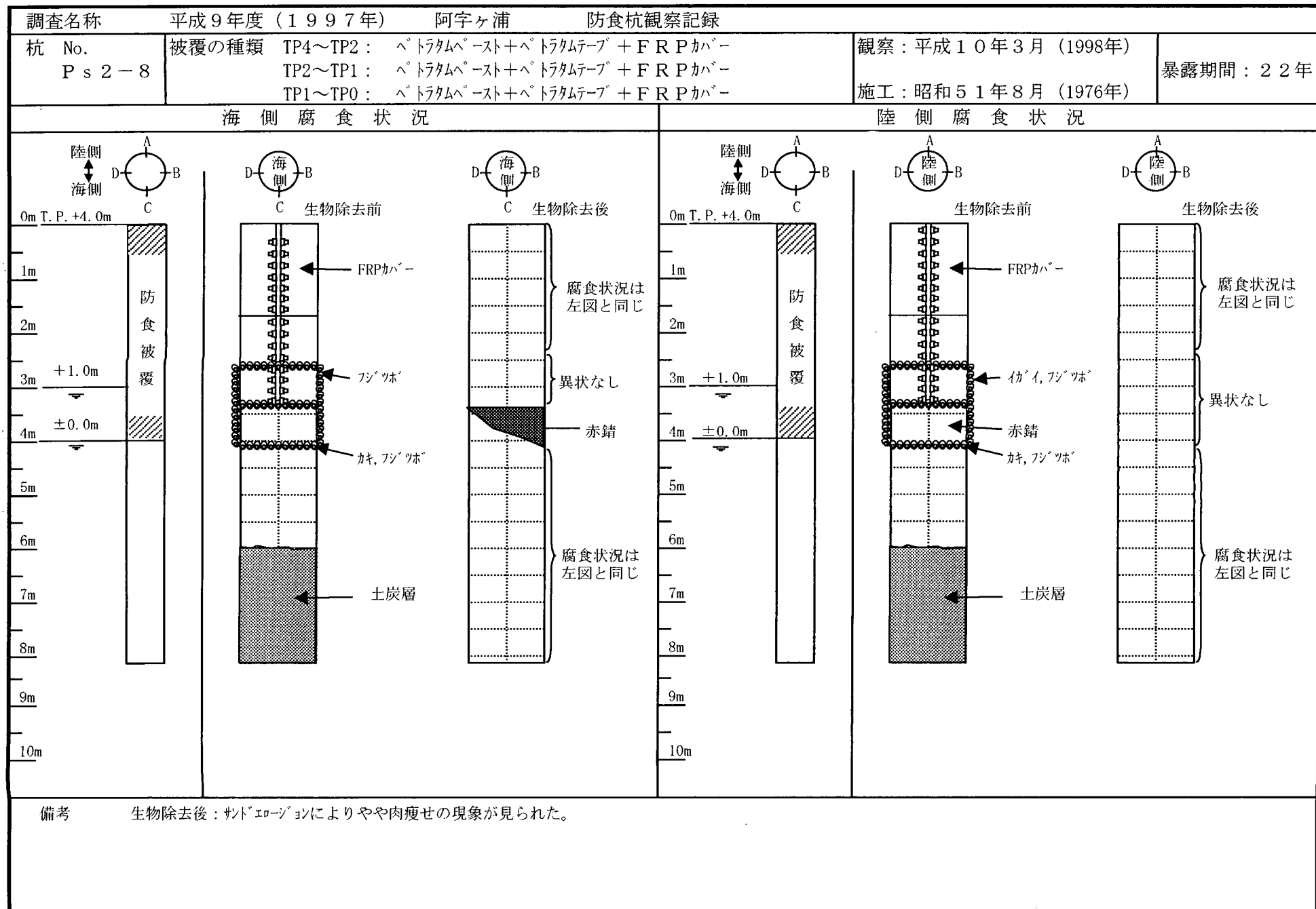


図 3.3-1 (4) 生物付着状況および被覆劣化状況

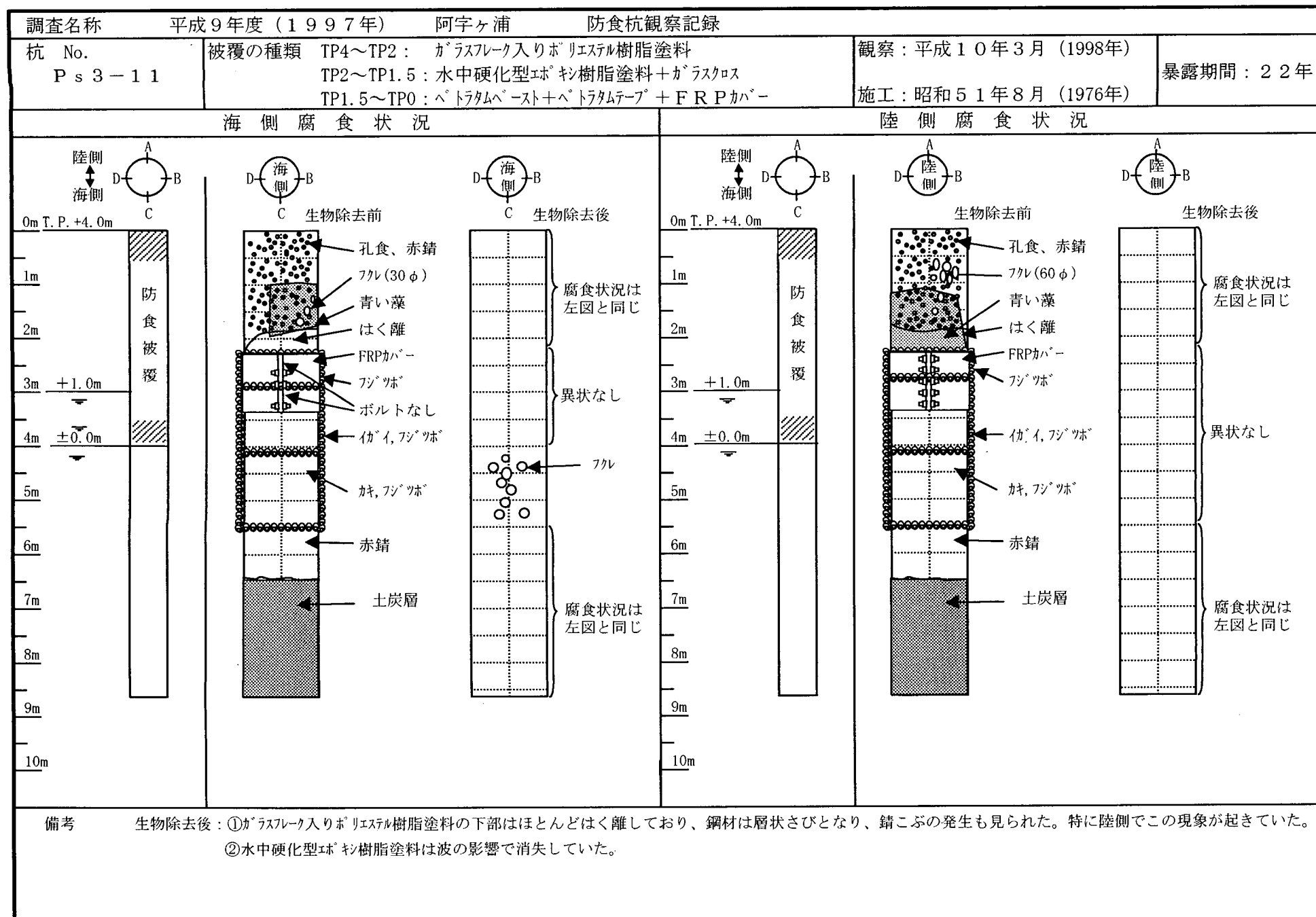


図 3.3-1 (5) 生物付着状況および被覆劣化状況

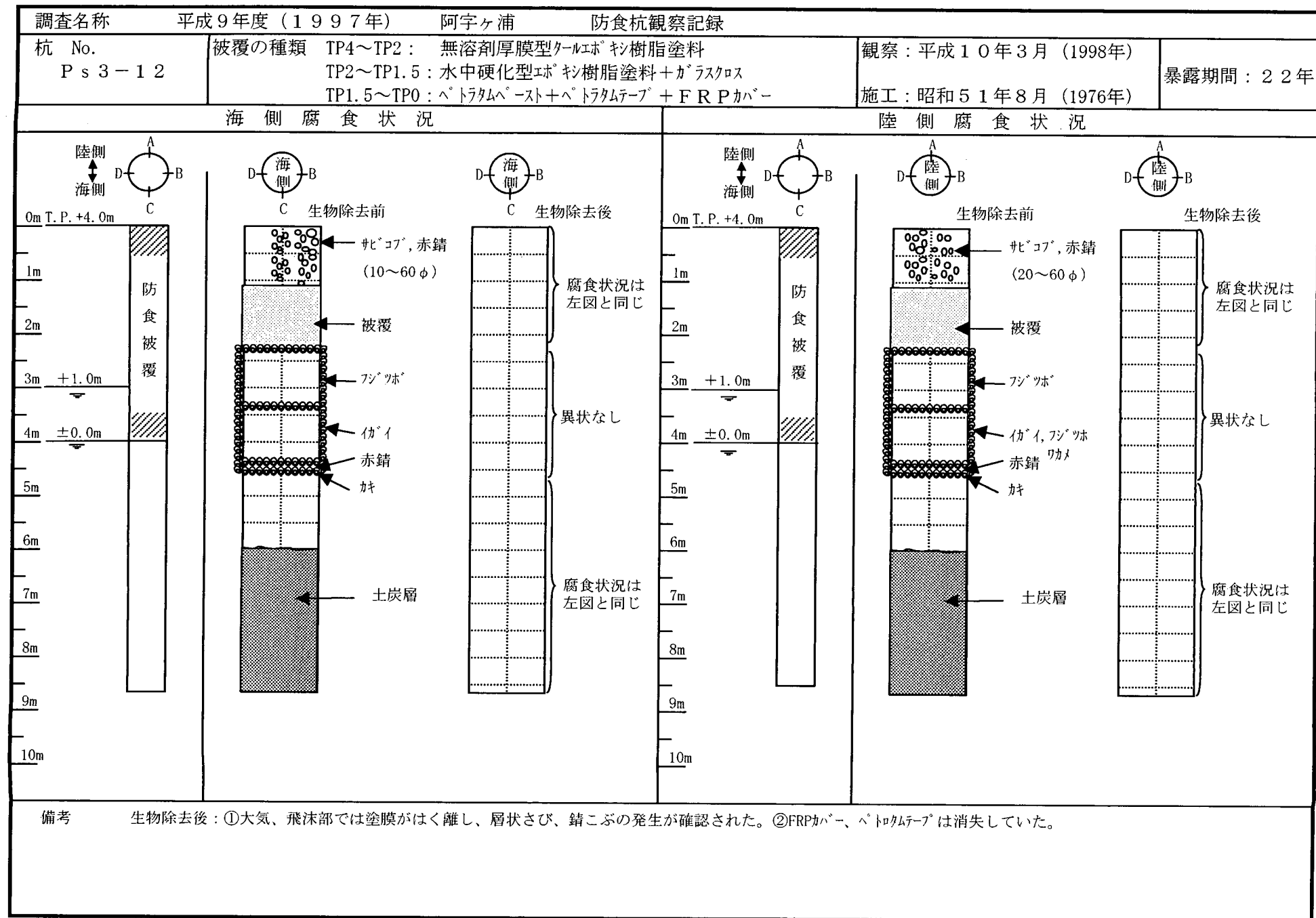


図 3.3-1 (6) 生物付着状況および被覆劣化状況

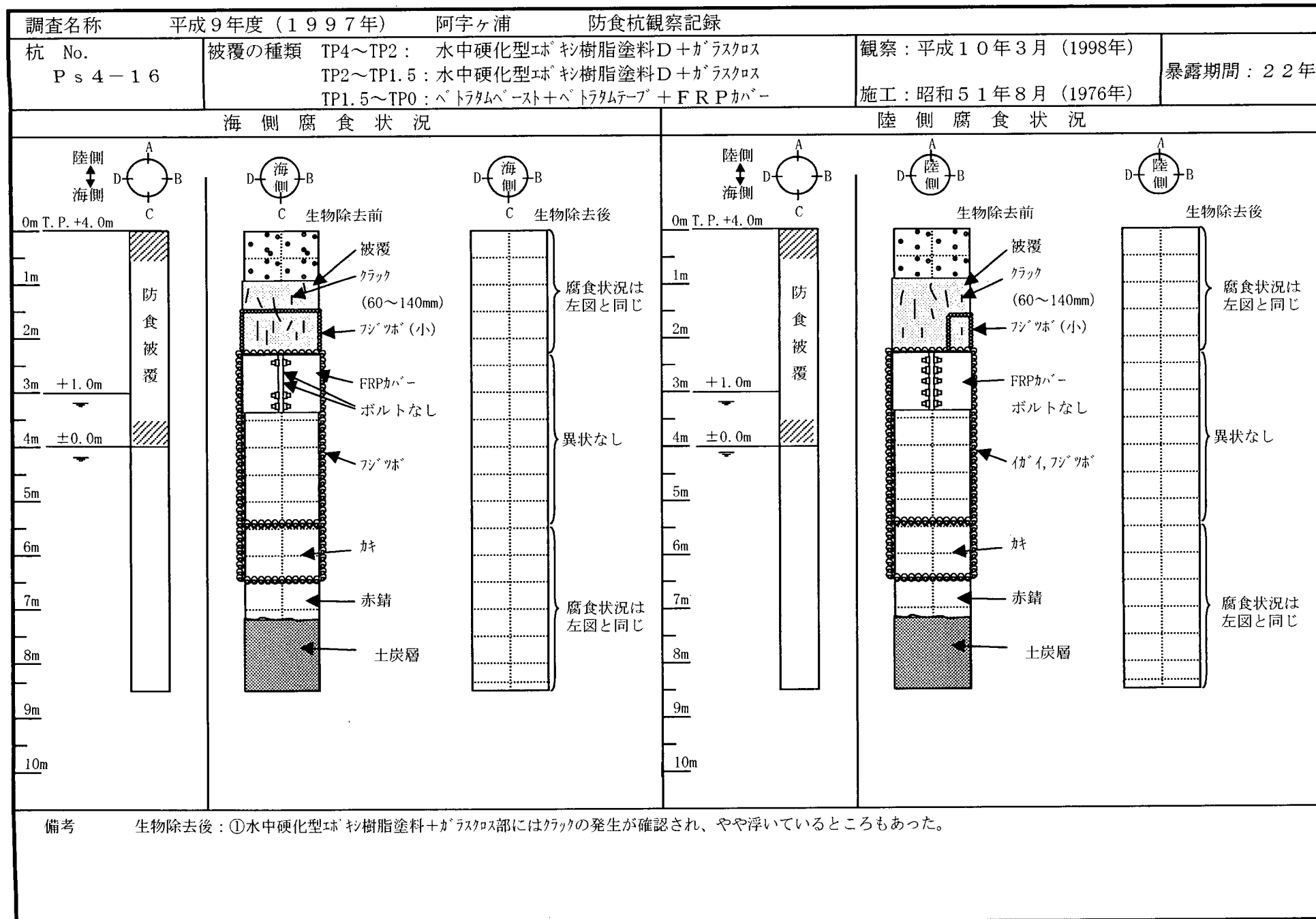


図 3.3-1 (7) 生物付着状況および被覆劣化状況

### 3. 3 詳細調査結果

調査対象鋼管杭の被覆の中で、投石等の影響の少ない沖側の部分を中心に、被覆の厚さ、被覆の付着力、被覆下の鋼材表面の腐食状況等、詳細な調査を行った。ただし、被覆厚さの測定は陸側も含めて行った。調査対象部位を図3.3-2に示す。

(ピアおよび試験杭の番号)

|              | 1—⑤        | 1—⑥        | 2—⑦        | 2—⑧        | 3—⑪        | 3—⑫        | 4—⑯        |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| T. P. +4.00m |            |            |            |            |            |            |            |
| +3.00        | ⑤-1        | <u>⑥-1</u> | ⑦-1        | ⑧-1        | ⑪-1        | ⑫-1        | ⑯-1        |
| +2.00        | <u>⑤-2</u> | <u>⑥-2</u> | <u>⑦-2</u> | <u>⑧-2</u> | <u>⑪-2</u> | <u>⑫-2</u> | <u>⑯-2</u> |
| +1.00        | <u>⑤-3</u> | <u>⑥-3</u> | <u>⑦-3</u> | <u>⑧-3</u> | ⑪-3        | ⑫-3        | ⑯-3        |
| ±0.00        | ⑤-4        | <u>⑥-4</u> | <u>⑦-4</u> | <u>⑧-4</u> | <u>⑪-4</u> | <u>⑫-4</u> | <u>⑯-4</u> |

(注) アンダーラインした部分が調査対象部位である

図3.3-2 防食被覆の調査対象部位

#### (1) 塗膜厚測定結果

塗膜厚測定結果を表3.3-1に示す。塗膜厚は、測定箇所が限定されたためか測定値のばらつきが大きく、また仕様膜厚や過去の実測値と比べても、かなり大きい場合や1/2程度と極端に小さい場合など、違うものがあつた。特に、干満部に施工した水中硬化型塗料の場合に顕著であつた。干満部での施工は、干潮時の限られた時間内に、しかも波浪の影響を受ける条件下で行うことを余儀なくされたこと、水中硬化型塗料の特徴として極めて粘性が高く施工性が悪いこと等が原因と考えられる。

表3.3-1 塗膜厚測定結果

(単位:  $\mu\text{m}$ )

| 試験片No. | 測定部位 | 海 側   | 陸 側   | 試験片No. | 測定部位 | 海 側   | 陸 側   |
|--------|------|-------|-------|--------|------|-------|-------|
| 1-⑤-2  | 1    | 482   | 402   | 1-⑤-3  | 1    | 2,850 | 6,610 |
|        | 2    | 385   | 459   |        | 2    | 2,620 | 5,000 |
|        | 3    | 617   | 563   |        | 3    | 2,300 | 5,450 |
|        | 平均值  | 495   | 475   |        | 平均值  | 2,590 | 5,687 |
| 1-⑥-1  | 1    | 917   | 1,082 | 1-⑥-2  | 1    | 786   | 562   |
|        | 2    | 1,069 | 619   |        | 2    | 551   | 607   |
|        | 3    | 1,279 | 774   |        | 3    | 1,299 | 857   |
|        | 平均值  | 1,088 | 825   |        | 平均值  | 879   | 675   |
| 1-⑥-3  | 1    | 3,260 | 3,150 | 2-⑦-2  | 1    | 539   | 600   |
|        | 2    | 2,220 | 2,500 |        | 2    | 764   | 550   |
|        | 3    | 3,060 | 1,800 |        | 3    | 689   | 439   |
|        | 平均值  | 2,847 | 2,483 |        | 平均值  | 664   | 530   |
| 3-⑪-2  | 1    | 269   | 408   | 4-⑫-2  | 1    | 5,930 | 5,200 |
|        | 2    | 507   | 590   |        | 2    | 5,390 | 6,200 |
|        | 3    | 338   | 605   |        | 3    | 6,800 | 5,100 |
|        | 平均值  | 371   | 534   |        | 平均值  | 6,040 | 5,500 |

\* 1-⑥-3 海側の薄い箇所: 1,700~2,000

\* 1-⑥-3 陸側の厚い箇所: 7,900 8,300 6,700

(2) 被覆の付着力試験結果

現地で施工した被覆の付着力をアドヒージョン試験により測定した結果を表3.3-2に示す。

表3.3-2 被覆の付着力試験結果 (アドヒージョン試験)

| 杭番号 | 部 位 | 防 食 被 覆 仕 様                     | はく離位置 (面積率%※)                                    | 付着強度<br>(N/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|
| 1—⑤ | ⑤—2 | エポキシ樹脂塗料下塗り＋<br>厚膜型エポキシ樹脂塗料×2   | ①素地90, 塗膜凝集破壊10<br>②素地70, 塗膜凝集破壊30               | 294, 343<br>(319)            |
|     | ⑤—3 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B                  | ①塗膜凝集破壊100<br>②塗膜凝集破壊100                         | 78, 20<br>(49)               |
| 1—⑥ | ⑥—1 | 有機ジンクリッチプライマー＋<br>厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 | ①塗膜凝集破壊90, 接着面10<br>②塗膜凝集破壊50, 素地40,<br>その他10    | 372, 392<br>(382)            |
|     | ⑥—2 | 有機ジンクリッチプライマー＋<br>厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 | ①素地70, 塗膜凝集破壊30<br>②接着面70, 素地30                  | 343, 323<br>(333)            |
|     | ⑥—3 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B                  | ①塗膜凝集破壊100<br>②塗膜凝集破壊100                         | 147, 147<br>(147)            |
| 2—⑦ | ⑦—2 | 変性エポキシ樹脂塗料×3                    | ①素地100<br>②素地80, 塗膜凝集破壊20                        | 0, 0<br>(0)                  |
| 3—⑪ | ⑪—2 | ガラスフレーク入りポリエステル<br>樹脂塗料         | ①素地100<br>②素地100                                 | 98, 49<br>(74)               |
| 4—⑯ | ⑯—2 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D<br>＋ガラスクロス       | ①塗膜凝集破壊100；クロス上<br>面より<br>②塗膜凝集破壊100；クロス上<br>面より | 294, 274<br>(284)            |

※面積率＝特定はく離箇所の面積／全はく離面積（測定器ドーリーの接着面積）×100％

防食被覆の付着強度は、今回採用したアドヒージョン試験で、 $100\text{N}/\text{cm}^2$  ( $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度)以上あれば、実用上の問題は生じないとされている。

試験結果を見ると、被覆のはく離試験で密着性に問題があると評価された被覆は、付着強度も小さく明らかに関連性が認められる。

しかし、被覆の付着強度は、施工時の被塗面の状態や被覆材料の物性の影響を受けるので、この結果だけで結論を下すのは危険と考えられるが、付着強度の低いものは、耐久性の点で好ましくないことは確かであると言える。

### (3) 防食被覆のはく離調査結果

昭和51年(1976)8月に既設鋼管杭に現地施工した防食被覆についてはく離調査は、投石による損傷を受けない沖側の比較的劣化の少ない部位で、かつ、鋼管杭の腐食状態が平均的な部位について行った。このような部位を調査の対象としたのは以下の理由による。

①防食被覆の防食性や耐久性は、施工時の気象条件や海象条件の良否とともに、素地調整や塗装を含む施工の良否の影響を強く受けることが良く知られており、状態の良い箇所の被覆は、良好に施工された箇所でもあり被覆本来の性能を示していると考えられる。

②鋼管杭の腐食、特に、孔食等の局部腐食により生じた凸凹は、塩分を含んださび層の残留や被覆の厚みの確保が困難などの理由から、平坦な箇所と比較して被覆の耐久性を低下させるので、調査箇所の選定に際しては、被覆の表面状態からできるかぎり代表的な腐食状態の箇所を選ぶ必要がある。

各杭の防食被覆の仕様、実測被覆厚さと併せて、はく離調査結果を表3.3-3(1)~(4)に示す。

表3.3-3(1) 防食被覆のはく離調査結果

| 杭番号 | 部位  | 被 覆 仕 様<br>(厚さ ; $\mu\text{m}$ )     | 実測厚さ<br>( $\mu\text{m}$ ) | 被覆のはく離調査結果                                                                                                                                                               |
|-----|-----|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1—⑤ | ⑤—2 | エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2<br>(440)   | 485                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜表面の白亜化が著しい</li> <li>・塗膜はやや脆くなっている</li> <li>・塗膜の素地への密着性は良好</li> <li>・鋼素地に薄い赤錆の層が認められる</li> </ul>                                |
|     | ⑤—3 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B<br>(5000)             | 4140                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜表層浅われ多数、深われも若干あり</li> <li>・塗膜の強度はやや小さいが柔軟性がある</li> <li>・塗膜の素地への密着性は良好</li> <li>・素地は金属光沢を呈している</li> </ul>                       |
| 1—⑥ | ⑥—1 | 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2<br>(415) | 957                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜表面の白亜化が著しい</li> <li>・塗膜は柔軟性を有し、密着性も良好</li> <li>・孔食部の一部に黒錆(点)発生箇所認められるが、大部分は金属光沢を呈す</li> </ul>                                  |
|     | ⑥—2 | 同上                                   | 777                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜表面の白亜化が著しい</li> <li>・塗膜は柔軟性を有し、密着性も良好</li> <li>・孔食部にも塗料が十分入っており発錆はなく、素地は金属光沢を呈している</li> </ul>                                  |
|     | ⑥—3 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B<br>(5000)             | 2670                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜表層浅われ多数、深われも若干あり</li> <li>・塗膜の強度はやや小さいが柔軟性がある</li> <li>・塗膜の素地への密着性は良好</li> <li>・素地の大部分は金属光沢を呈しているが塗膜の薄い箇所に薄い錆層が見られる</li> </ul> |

表3.3-3(2) 防食被覆のはく離調査結果

| 杭番号 | 部位  | 被 覆 仕 様<br>(厚さ ; $\mu\text{m}$ )              | 実測厚さ<br>( $\mu\text{m}$ ) | 被覆のはく離調査結果                                                                                                                                                    |
|-----|-----|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1—⑥ | ⑥—4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ペトロラタムは健全な状態にある</li> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> <li>・研磨すると金属光沢を呈す</li> <li>・FRPカバー破損大、黄銅製ボルト磨耗著しい</li> </ul> |
| 2—⑦ | ⑦—2 | 変性エポキシ樹脂塗料<br>$\times 3$<br>(390)             | 597                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜は脆く、密着性も良くない</li> <li>・素地の全面に赤錆が発生しており、進行性は小さいと思われるが、孔食部の一部に進行性の点錆が認められる</li> </ul>                                 |
|     | ⑦—3 | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B<br>(5000)                      | 2250<br>(ノギスによる測定)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜の強度はやや小さいが柔軟性がある</li> <li>・塗膜にひび割れや剥離箇所が多く、素地から発錆している</li> <li>・変性エポキシ塗装の不十分な箇所に施工</li> </ul>                       |
|     | ⑦—4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> <li>・⑥—4と同様に、ペトロラタムは油分が多く健全な状態にある</li> </ul>                                           |
| 2—⑧ | ⑧—2 | 同上                                            | ほぼ仕様<br>どおり               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> </ul>                                                                                  |
|     | ⑧—3 | 同上                                            | ほぼ仕様<br>どおり               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> </ul>                                                                                  |

表3.3-3(3) 防食被覆のはく離調査結果

| 杭番号 | 部位  | 被 覆 仕 様<br>(厚さ ; $\mu\text{m}$ )              | 実測厚さ<br>( $\mu\text{m}$ )   | 被覆のはく離調査結果                                                                                                                        |
|-----|-----|-----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2—⑧ | ⑧—4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> <li>・杭引抜き直後にはく離調査した箇所は、1週間経過しており、若干赤錆が発生</li> </ul>        |
| 3—⑪ | ⑪—2 | ガラスフレーク入りポリ<br>エステル樹脂塗料<br>(1000)             | 453                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜は脆く、密着性も良くないが、脆いのはこの塗料の特徴とも考えられる</li> <li>・素地の大部分は金属光沢を呈しているが、一部に薄い赤錆の層が見られる</li> </ul> |
|     | ⑪—4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> </ul>                                                      |
| 3—⑫ | ⑫—2 | 無溶剤型厚膜型タール<br>エポキシ樹脂塗料<br>(500)               | 波高く<br>施工不能<br>塗膜なし<br>全面さび | <ul style="list-style-type: none"> <li>・錆瘤が全面に生じている</li> <li>・塗膜の存在は認められない</li> </ul>                                             |
|     | ⑫—4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> </ul>                                                      |
| 4—⑯ | ⑯—2 | 水中硬化型エポキシ樹<br>脂塗料D+ガラスクロ<br>ス<br>(4000)       | 5770                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塗膜は強靱である</li> <li>・素地への密着性良好</li> <li>・所々に大きいひび割れが見られる</li> <li>・素地は金属光沢を呈している</li> </ul> |

表3.3-3(4) 防食被覆のはく離調査結果

| 杭番号 | 部位  | 被 覆 仕 様<br>(厚さ ; $\mu\text{m}$ )              | 実測厚さ<br>( $\mu\text{m}$ ) | 被覆のはく離調査結果                                                                                                                                 |
|-----|-----|-----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4-⑩ | ⑩-4 | ペトロラタムペースト<br>+ペトロラタムテープ<br>+FRPカバー<br>(4500) | ほぼ仕様<br>どおり               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・素地は黒色のタンニン酸鉄に覆われ安定した状態にある</li> <li>・テープの密着性良好、FRPカバーの状態も良好、黄銅製ボルト・ナットの脱落消耗著しい(10本中3本脱落)</li> </ul> |

既設鋼管杭に現地施工した各種防食被覆の防食性や耐久性を評価すると以下のようである。

なお、評価に際しては、以下の事項を考慮した。

①(ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ ; 2mm)+(FRPカバー ; 2.5mm)は、昭和56年(1981)7月に、EPTゴムカバーに緩みやめくれが生じたため、現行仕様での再施工あるいは、カバーの交換(EPTゴムをFRPに替える)をしている。

②既設鋼管杭に施した塗覆装の陸側の面は、投石等による被覆の損傷が認められ、それが、被覆の耐久性評価に影響する恐れがあると判断されたため、今回の評価では、そのような心配の少ない沖側の面について評価した。

#### (1) エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2

現行の仕様では、防食性と耐候性の点で減点があり、やや不良と評価されるが、観察箇所の実測塗膜厚が500 $\mu\text{m}$ 未満で比較的小さい点を考慮すれば、塗膜厚増加による防食性改善の余地がある。また、耐候性はポリウレタン樹脂塗料の上塗りにより改善できよう。この塗装系は、劣化塗膜の塗り替えの場合に、活膜残存部への付着性が良く塗り替え塗装系としての適性があるので、更に塗膜厚を増すことにより十分実用に供し得る塗装仕様になると考えられる。

#### (2) 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2

全体的に防食性が良好であり、耐候性の不備をポリウレタン樹脂塗料の上塗りにより補えば、信頼性のある塗装仕様になると考えられる。評価点は良と判定される。しかし、有機ジンクリッチプライマーは、劣化塗膜の塗り替えに適用した場合には、残存活膜に対する付着性に問題があるので、無塗装の場合や一種ケレンを適用する場合の塗装に適していると考えられる。

#### (3) 変性エポキシ樹脂塗料×3

被覆のはく離調査の結果から防食性に問題があり、また、付着性や耐候性も良くないので、評価は不良と判定される。若干塗膜厚を増す程度では、耐久性の向上はあまり期待できないと思われる。

#### (4) ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料

美粧効果よりも防食効果を重視した被覆であり、少ない塗装回数で大きな塗膜厚が得られる利点を買って

採用したが、全体的には仕様どおりの塗膜厚が得られなかった。塗膜が脆く付着性も十分とはいえないが、波浪が碎ける厳しい環境条件下で施工され、かつ、塗膜の厚みが比較的小さい割に防食性は良好であり、海上が穏やかな時期に仕様どおりの厚膜塗装ができれば、優れた防食効果を発揮できると考えられる。したがって、評価は良と判定した。

#### (5) 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B

防食だけを考えた被覆であり、手塗り（ウェットハンド法）で塗装したため、塗膜への海水混入による物性低下もあり、塗膜厚が不十分な箇所では、われが原因となって塗膜下での腐食が見られたが、塗膜の厚みが5mm以上ある部分では、われは表層にとどまり、十分な防食性を保持している。したがって、評価は良と判定した。

#### (6) 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロス補強

ガラスクロスで補強した水中硬化型エポキシ樹脂塗料の被覆は、所々に大きなひび割れが発生しているが、被覆の厚みは平均6mm近くあるため、ほとんど腐食は生じていず、防食効果は十分と考えられる。したがって評価は優良と判定した。

しかし、ガラスクロスと樹脂の間ではく離していることから、クロスと樹脂の接着強度を高めるようなクロスの表面処理やクロスの代わりにネットを使用するなどの改善策についての検討が今後の課題と考えられる。

#### (7) ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー

FRPカバーの破損や黄銅製ボルト・ナットの脱落や磨耗などの問題はあるが、ペトロラタムテープを巻いた部分は、ペトロラタムに添加されている防錆剤のタンニン酸の働きにより、完全に不活性な状態になっている。したがって、カバー交換後の経過年数は他の被覆より5年程度短い17年であるが、防食効果を受け持つペトロラタムテープは他の被覆と暴露期間は同じなので、保護カバーや止め金具の定期的な点検と交換を前提にすれば、防食効果を半永久的に保持することが可能と考えられるので、評価は優良と判定した。

### 3. 4 総合評価結果

現地施工した防食被覆の総合評価結果を表3.3-4に示す。

表3.3-4(1) 防食被覆の総合評価結果

| 杭番号 | 調査部位 | 被 覆 仕 様                     | 曝 露 年 数 |    |    |    |    |     |
|-----|------|-----------------------------|---------|----|----|----|----|-----|
|     |      |                             | 1年      | 2年 | 3年 | 4年 | 5年 | 22年 |
| 1—⑤ | ⑤—2  | エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2   | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | △   |
|     | ⑤—3  | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B              | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | △   |
| 1—⑥ | ⑥—1  | 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | △   |
|     | ⑥—2  | 同上                          | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | △   |
|     | ⑥—3  | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B              | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | △   |
|     | ⑥—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー | —       | —  | —  | —  | 補修 | △   |
| 2—⑦ | ⑦—2  | 変性エポキシ樹脂塗料×3                | ○       | ○  | ○  | ○  | —  | ×   |
|     | ⑦—3  | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B              | ○       | ○  | ×  | ×  | —  | ×   |
|     | ⑦—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー | —       | —  | —  | —  | 補修 | ○   |

表3.3-4(2) 防食被覆の総合評価結果

| 杭番号 | 調査部位 | 被 覆 仕 様                              | 曝 露 年 数 |    |    |    |           |     |
|-----|------|--------------------------------------|---------|----|----|----|-----------|-----|
|     |      |                                      | 1年      | 2年 | 3年 | 4年 | 5年        | 22年 |
| 2—⑧ | ⑧—2  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+EPTカバー (FRPカバー) | ○       | ○  | ○  | ○  | FRPカバーと交換 | ○   |
|     | ⑧—3  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+EPTカバー (FRPカバー) | ○       | ○  | ○  | ○  | FRPカバーと交換 | ○   |
|     | ⑧—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー          | —       | —  | —  | —  | 補修        | ○   |
| 3—⑪ | ⑪—2  | ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料                  | ○       | ○  | ○  | ○  | —         | △   |
|     | ⑪—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー          | —       | —  | —  | —  | 補修        | ○   |
| 3—⑫ | ⑫—2  | 無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料                   | ×       | ×  | ×  | ×  | —         | ×   |
|     | ⑫—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー          | —       | —  | —  | —  | 補修        | ×   |
| 4—⑯ | ⑯—2  | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロス                | ○       | ○  | ○  | ○  | —         | ○   |
|     | ⑯—4  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー          | —       | —  | —  | —  | 補修        | ○   |

評価基準は以下のとおりである。

○：優良（発錆などの劣化が少ない）

△：やや不良（発錆などの劣化がかなり多く、膜厚を増すなどの改善が必要）

×

### 3. 5 ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバーに関する試験結果

ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバーは、昭和51年(1976)8月に施工したペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+EPTカバー防食被覆のEPTカバーが、経年的にゆるみがでて波浪によりめくれるなど、保護カバーとしての機能低下が心配される状態となったため、昭和56年(1981)7月にEPTカバーをFRPカバーと交換したものである。今回の調査では、上記の防食被覆を施した鋼管杭の中から、Ps 2 No. 8の鋼管杭を選び、①防食を担っているペトロラタムテープに含まれるペトロラタムの防食性②FRPカバーの強度、③FRPカバーとペトロラタムテープの間にあって保護カバーのゆるみを押さえ、その反力でペトロラタムテープを鋼管に押しつける役割を担っているクッション材(独立気泡の発泡ポリエチレン)の復元性がどの程度保たれているかなど、調べた結果を以下に示す。

#### (1) FRPカバー取り外し前の外観観察結果

##### a) 飛沫部

上部からの貫いさびにより表面が錆び色に変色しているが、機能に影響するようなひび割れ等の損傷は見られなかった。また、カバー取り付け用の黄銅製ボルト、ナットも、貫いさび等により汚れているが、ほぼ原型を保っていた。

##### b) 干満部

T.P. + 1m以下には海洋生物の付着が認められたが、FRPカバーへの食い込みは見られなかった。T.P. + 0.5m以下のボルト、ナットは、当初の寸法の2/3程度まで磨耗しており、一部脱落箇所も認められた。漂砂による磨耗と海水による脱亜鉛腐食が考えられる。

#### (2) FRPカバー取り外し後の外観観察結果

飛沫部のペトロラタムテープは、油分も十分含まれており異常は認められなかった。干満部のペトロラタムテープは、若干油分が少なくなっているように感じられるが、現状では防食性能に影響する程ではないと判断された。

クッション材は、FRPカバーのフランジ近傍で厚さがやや減少していたものの、他の部分は、飛沫部、干満部ともほぼ原型を保っていた。

#### (3) 鋼材表面の外観観察結果

ペトロラタムテープをはく離した直後の鋼材表面は、きれいな黒色を呈しており、茶褐色のさびは認められなかった。これは、ペトロラタムに添加されているタンニンの作用で、鋼表面にタンニン酸鉄の安定皮膜が形成されたためと考えられる。

#### (4) FRPカバーの物性試験結果

引き抜いた鋼管杭から回収したFRPカバー以下の試験片を切り出し、JIS-K7074, K7055(ガラス繊維強化プラスチックの引張試験法、曲げ試験法)に基づき、引張試験および曲げ試験を行った。

##### 【試験片】

|     |        |     |
|-----|--------|-----|
| 飛沫部 | ： 引張試験 | 5 枚 |
|     | ： 曲げ試験 | 5 枚 |
| 干満部 | ： 引張試験 | 5 枚 |
|     | ： 曲げ試験 | 5 枚 |

1) 引張試験結果

引張試験結果を表3.3-5に示す。

表3.3-5 引張試験結果

| 試験片No.        | 曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> ) |                 |
|---------------|---------------------------|-----------------|
|               | 飛 沫 部                     | 干 満 部           |
| 1             | 113.9                     | 112.0           |
| 2             | 112.8                     | 138.1           |
| 3             | 155.7                     | 140.0           |
| 4             | 150.2                     | 148.8           |
| 5             | 133.5                     | 147.5           |
| 平 均<br>(標準偏差) | 133.2<br>(19.9)           | 137.3<br>(14.9) |

試験結果から、飛沫部の方が幾分大きい値を示しているが、ばらつきを考慮すれば、有意差を見いだすことはできない。

2) 曲げ試験結果

曲げ試験結果を表3.3-6に示す。

表3.3-6 曲げ試験結果

| 試験片No.        | 曲げ強さ (N/mm <sup>2</sup> ) |                 |
|---------------|---------------------------|-----------------|
|               | 飛 沫 部                     | 干 満 部           |
| 1             | 113.9                     | 112.0           |
| 2             | 112.8                     | 138.1           |
| 3             | 155.7                     | 140.0           |
| 4             | 150.2                     | 148.8           |
| 5             | 133.5                     | 147.5           |
| 平 均<br>(標準偏差) | 133.2<br>(19.9)           | 137.3<br>(14.9) |

試験の結果は、干満部の方が少し強度が高いがばらつきを考慮すれば有意差があるとは言えない。

(5) ペトロラタムテープの絶縁抵抗試験結果

回収したペトロラタムテープの劣化を調べるのに適した試験法がなく、交流インピーダンス法による絶縁抵抗の測定を試みた。試験片には、飛沫部および干満部からはく離した各5個の40cm×40cmのペトロラタムテープを用い、これを鋼板に貼り付け周波数1kHzで絶縁抵抗を測定した。測定結果を表3.3-7に示す。

表3.3-7 絶縁抵抗試験結果

| 試験片No. | 絶縁抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) |                   | 備 考<br>(未使用テープ)      |
|--------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|
|        | 飛沫部                                 | 干満部               |                      |
| 1      | $2.4 \times 10^6$                   | $6.6 \times 10^6$ | $1.1 \times 10^{10}$ |
| 2      | $6.5 \times 10^6$                   | $9.2 \times 10^6$ | $1.5 \times 10^9$    |
| 3      | $1.0 \times 10^8$                   | $2.4 \times 10^6$ | $8.2 \times 10^9$    |
| 4      | $1.2 \times 10^8$                   | $7.9 \times 10^7$ | $1.6 \times 10^9$    |
| 5      | $1.9 \times 10^8$                   | $1.1 \times 10^7$ | $1.2 \times 10^{10}$ |

ペトロラタムテープの劣化を調べるために交流インピーダンス法による絶縁抵抗の測定を試みた。絶縁抵抗の変化でペトロラタムテープの劣化を評価した例は過去に見当たらないため推論になるが、今回の測定結果から以下のように推定される。

絶縁抵抗値は、未使用テープ ( $10^9 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ )、飛沫部 ( $10^6 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ )、干満部 ( $10^6 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) の順に低くなっている。このことは、ペトロラタムテープ（ガラス繊維にペトロラタムを含浸したテープ）から、約20年の間にペトロラタム分が徐々に流出したり、海水中の塩分が浸透したりしたためではないかと推察される。しかし、いずれの部位も  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  以上の絶縁抵抗値を有していることから、防食に必要な機能は十分発揮できる状態を保持していると考えられる。

ペトロラタムテープの性能評価は、これまで目視による観察が主であったが、今回のようなデータの集積により、より精度の高い定量的な評価が可能になると考えられる。

### 3. 6 鋼管杭の肉厚測定結果

陸上にあるPs 0 のNo. 1 杭（基準とする）とアルミニウム合金陽極を取り付けたPs 2 のNo. 8 杭を選んで行った鋼管杭の肉厚測定結果を表3. 3-8(1), (2)および図3. 3-3に示す。

表3. 3-8(1) Ps 0 のNo. 1 杭（基準）の肉厚測定結果

| 測定点<br>(深度)  | 陸 側   |        |       |        |
|--------------|-------|--------|-------|--------|
|              | 平均値   | 平均腐食速度 | 最大値   | 最大腐食速度 |
| T. P. ±0. 0m | 1. 43 | 0. 057 | 3. 44 | 0. 138 |
| -2. 0m       | 0. 12 | 0. 005 | 0. 17 | 0. 007 |
| -4. 0m       | 0. 09 | 0. 003 | 0. 15 | 0. 006 |

単位は、平均値，最大値：mm，腐食速度：mm/yr

表3. 3-8(2) Ps 2 No. 8 杭（電気防食）の肉厚測定結果

| 測定点<br>(深度)  | 海 側   |        |       |        | 陸 側   |        |       |        |
|--------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
|              | 平均値   | 平均腐食速度 | 最大値   | 最大腐食速度 | 平均値   | 平均腐食速度 | 最大値   | 最大腐食速度 |
| T. P. ±0. 5m | 1. 20 | 0. 048 | 1. 85 | 0. 074 | 1. 08 | 0. 043 | 1. 55 | 0. 062 |
| -1. 0        | 1. 53 | 0. 061 | 1. 64 | 0. 066 | 1. 45 | 0. 058 | 1. 67 | 0. 067 |
| -1. 5        | 0. 92 | 0. 037 | 1. 01 | 0. 040 | 0. 76 | 0. 030 | 0. 94 | 0. 038 |
| -2. 0        | 0. 28 | 0. 011 | 0. 31 | 0. 012 | 0. 35 | 0. 014 | 0. 38 | 0. 015 |
| -2. 5        | 0. 20 | 0. 008 | 0. 22 | 0. 009 | 0. 27 | 0. 011 | 0. 19 | 0. 007 |
| -3. 5        | 0. 15 | 0. 006 | 0. 17 | 0. 007 | 0. 19 | 0. 007 | 0. 24 | 0. 010 |

単位は、平均値，最大値：mm，腐食速度：mm/yr

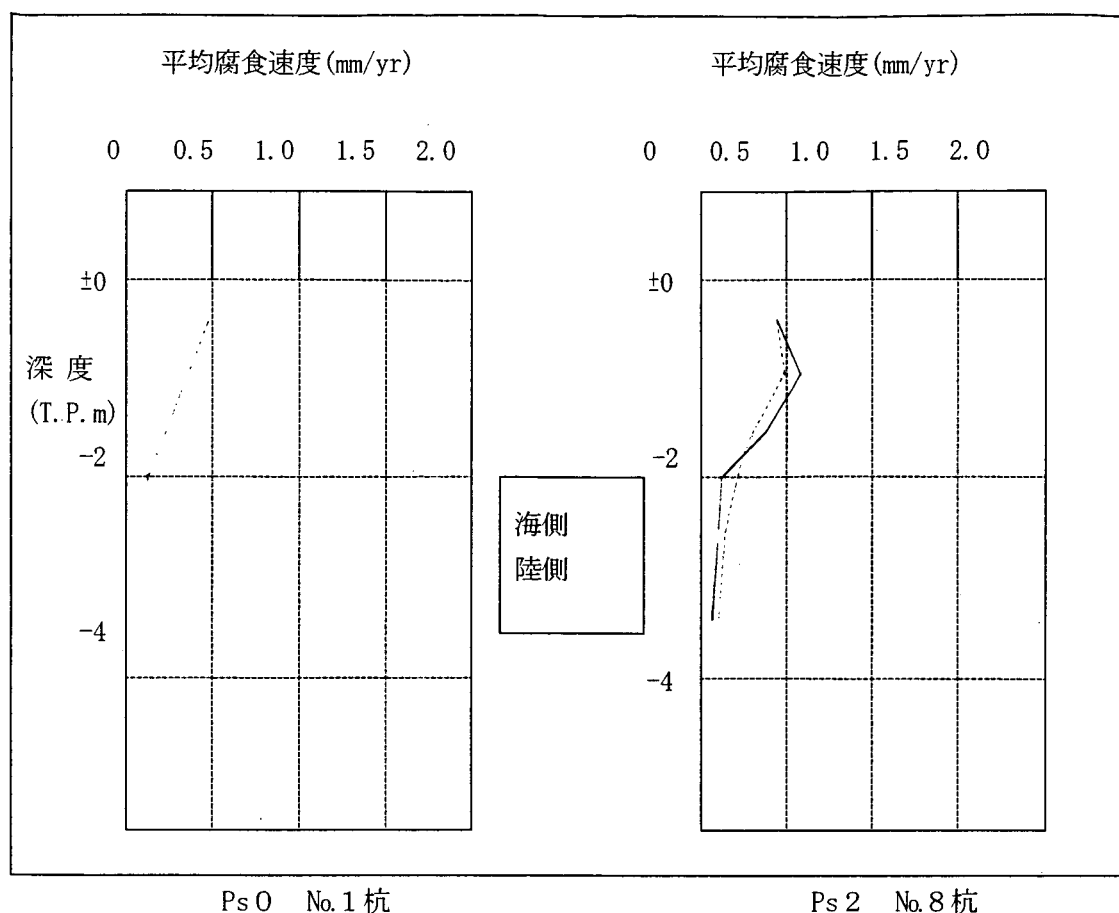
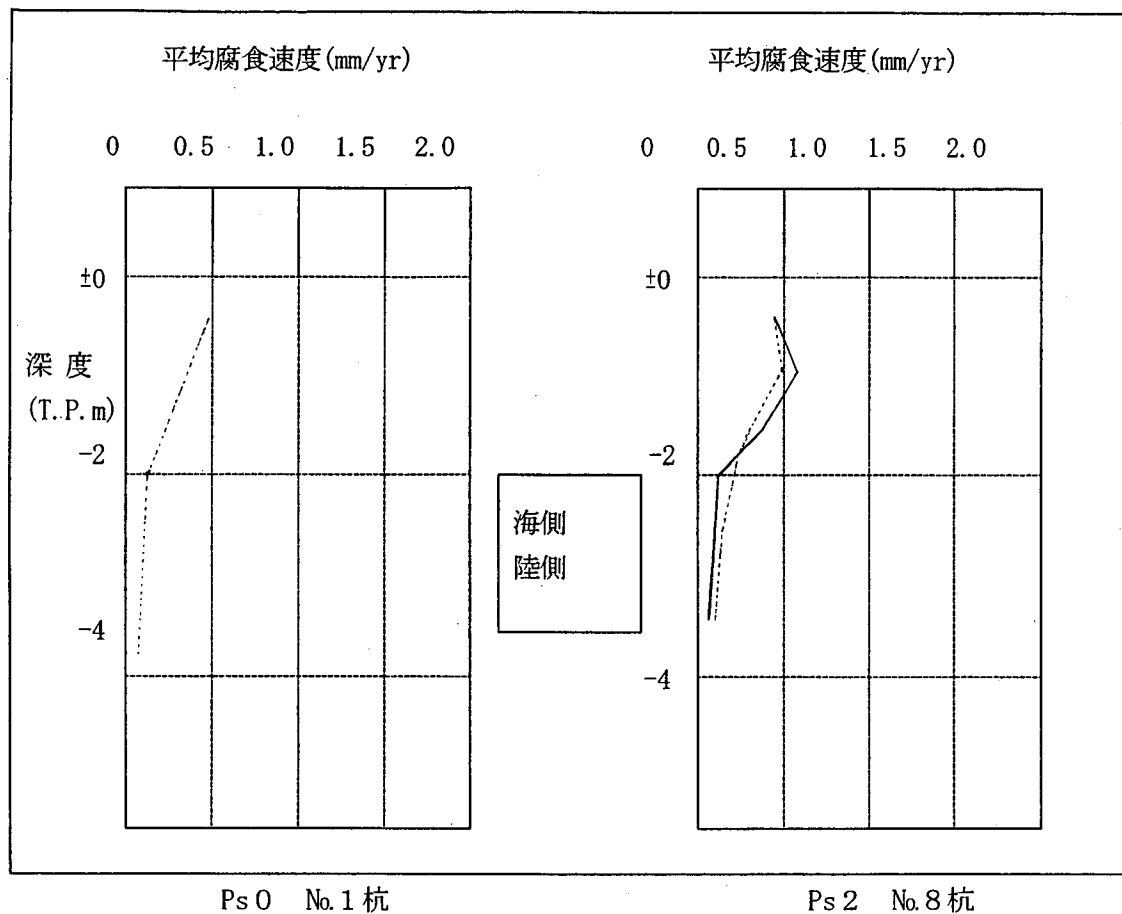


図3.3-3 肉厚測定結果

一般に、海底土中における鋼材の腐食速度は、海水中での腐食速度より小さく、日本港湾協会の『港湾の施設の技術上の基準・同解説』によると、海水中の腐食速度0.1mm/yr程度に対して、海底土中の腐食速度は0.03mm/yr程度とされている。この数値は環境条件や供用条件により影響される。調査の対象となった鋼管杭は、打ち込み後4年経過してから電気防食を施したものであるにもかかわらず、海水中部分の平均腐食量は最も大きい部位でも0.06mm/yr、腐食の少ない部位では0.01mm/yr以下と非常に少ない。

また、漂砂による磨耗作用を受けやすい海底付近の鋼管について測定しているが、上記のPs 2 No. 8 杭の腐食速度の値からサンドエロージョンの影響を認めることは困難である。これは、電気防食により鋼管表面の腐食が抑制される結果、サンドエロージョンの影響が、鋼材の磨耗に限定されるためではないかと考えられる。

\*図 3.3-3 肉厚測定結果は、不鮮明なため恐縮ですが、こちらの図を参照してください。



## 4. 調査結果の検討

### 4. 1 補修効果について

補修方法に関する試験施工および試験施工実施後の防食被覆の追跡調査で明らかとなった防食仕様別の補修効果の一端は、総合評価結果の表に示したとおりである。この評価結果を基に被覆のはく離調査結果、塗膜厚測定結果および付着力測定結果等を加味して、飛沫部と干満部を対象とした補修の効果を検討した結果を以下に示す。

#### (1) 飛沫部の補修効果

飛沫部は、上部と下部では施工条件や環境条件が異なると考えられるので、補修の効果も飛沫部の上部と下部に分ける。

##### 1) 飛沫部上部の補修効果

飛沫部の上部に適用された被覆の種類は、塗装をはじめ多種にわたるが、その中に、ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ+FRPカバー（以下、ペトロラタム系被覆と呼ぶ）が含まれている。ペトロラタム系被覆のFRPカバーは、施工後4年経過した時点で、当初用いたEPTゴムカバーに弛みが生じ、めくれ、ずれ、しわなどが目立つようになったため、5年目にEPTゴムカバーをFRPカバーと交換している。

これら防食被覆の補修効果は、ペトロラタム系被覆の場合は、極めて良好な外観状態で22年を経過し、防食効果にも何ら問題なく、ペトロラタムテープは十分に油分を含み劣化の傾向は小さく、今後、更に長期の防食効果が期待できる状態であった。しかし、ペトロラタム系被覆を除いた11仕様の中で、22年経過後もある程度の防食効果が期待できる状態のものは、水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロス、エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2、有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2、ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料の4仕様のみで、4仕様の中では、水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロスが被覆に部分的なわれの発生が認められた程度で良い状態であった。その他の仕様は、施工はできたものの経年的に劣化が進み22年後の調査では、長期の耐久性は認められないとの評価であった。

##### 2) 飛沫部下部の補修効果

飛沫部下部に適用された防食仕様は、上部の場合と同じで、ペトロラタム系被覆を含む12仕様である。ペトロラタム系被覆は、飛沫部上部の場合と同様に22年経過後も極めて良好な外観状態を保ち、ペトロラタムテープにも何らの異状は認められず、今後、更に長期の防食性、耐久性が期待できるものであった。また、水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロスは、海上が静穏なときに施工できたためか、部分的なわれの発生が認められるものの良好な状態であった。エポキシ樹脂塗料下塗り+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2、有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2、ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料の3仕様も、飛沫部上部と大差のない状態であった。

水中硬化型エポキシ樹脂塗料Bは、一部にわれやさびが発生し、防食効果が次第に低下している状態のものや、さびが広がり完全に防食効果を失っていると判断される状態のものがあり、施工時の波浪の影響を裏付ける状況であった。その他の仕様は、いずれも被覆が劣化あるいは脱落してさび瘤が発生しており防食効果が完全に失われた状態であった。

追跡調査により明らかとなった施工22年後の劣化状態は、施工直後や施工3~4年後の状態と密接な関連があり、施工の良否で被覆の耐久性が左右されることから、適用される環境に適性のある防食被覆を選ぶことの重要さは勿論であるが、海上が静穏で良好な施工、養生のできる機会を選んで施工することは、更に重要であることを示していると言える。

## (2) 干満部の補修効果

干満部に適用した塗布型の被覆では、硬化がある程度進まないと、波浪による衝撃力に耐えられるだけの接着力や物性を有しておらず、通常の施工環境では事実上施工できないため、ペトロラタム系被覆、水中硬化型エポキシ樹脂塗料を用いる4種類の仕様およびセメントモルタル+FRPカバーの計6種類の仕様を選定した。

ペトロラタム系被覆の場合、カバーにEPTゴムシートを採用していた初期には、経時的にシートがゆるみずり落ちたりしわができていたりして、ペトロラタムテープを押しつける力の低下や、波浪によりカバーがめくれる等の問題が生じたため、EPTゴムシートカバーをFRPカバーと交換したものである。カバーを交換してからは、良好な状態で経過し22年後の調査では、黄銅製ボルト、ナットの消耗や一部のボルトの脱落はあったものの極めて良好な防食性、耐久性を示した。

次いで良い結果を示した被覆は、水中硬化型エポキシ樹脂塗料を用いる被覆の中の水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロスで、被覆にわれの発生が認められたものの22年経過後も一定の防食効果を維持しているとの評価が得られた。水中硬化型エポキシ樹脂塗料Bは、高粘度ではあるが可塑性に富み、水に濡れた面にも良く付着する性状で施工しやすかったため、施工できた上部は長期間の耐久性を示したが、波浪を直接受ける部位では被覆の形成が妨げられ、部分的に塗料が流失したため、満足できる補修効果は得られなかった。また、水中硬化型エポキシ樹脂塗料Aは、施工性に問題があったため全体的に施工が困難で、長期の耐久性は得られず、型枠内部に注入する方式の水中硬化型エポキシ樹脂塗料Cも、注入が困難で良好な被覆を形成できず、長期の耐久性は得られなかった。もう1種類のセメントモルタル+FRPカバーは、施工はできたが短期間で被覆が落下し初期の目的を果たせなかった。

試験に供した防食被覆の飛沫部・干満部での補修効果を表3.4-1に示す。

表3. 4-1 防食被覆の種類と適用部位別補修効果の比較

| 防 食 被 覆 の 種 類                                         | 飛 沫 部 |    | 干満部 |    |
|-------------------------------------------------------|-------|----|-----|----|
|                                                       | 上部    | 下部 | 上部  | 下部 |
| 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型ビニル樹脂塗料 275 $\mu$ m/(283 $\mu$ m) *  | ×     | ×  | —   | —  |
| 有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 415 $\mu$ m/(957 $\mu$ m) | △     | △  | —   | —  |
| 変性エポキシ樹脂塗料+エポキシ樹脂塗料 300 $\mu$ m/(333 $\mu$ m) *       | ×     | ×  | —   | —  |
| エポキシ樹脂塗料下塗+厚膜型エポキシ樹脂塗料×2 440 $\mu$ m/(485 $\mu$ m)    | △     | △  | —   | —  |
| 変性エポキシ樹脂塗料×3 390 $\mu$ m/(380 $\mu$ m) *              | ×     | ×  | —   | —  |
| 無溶剤型エポキシ樹脂塗料+ポリウレタン樹脂塗料 330 $\mu$ m/(344 $\mu$ m) *   | ×     | ×  | —   | —  |
| 無溶剤型厚膜型タールエポキシ樹脂塗料 500 $\mu$ m/(施工不良)                 | ×     | ×  | —   | —  |
| ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 1000 $\mu$ m/(450 $\mu$ m)        | △     | △  | —   | —  |
| 下塗り剤+接着剤+常温加硫型クロロプレンゴムシート 3 mm                        | ×     | ×  | —   | —  |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料A 5 mm/(2. 5mm) *                        | —     | —  | ×   | —  |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料B 5 mm/(4. 14mm)                         | —     | —  | △   | —  |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料C (型枠注入式) 5 mm                           | —     | —  | ×   | —  |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料D+ガラスクロス 4 mm/(5. 77mm)                  | ○     | ○  | ○   | —  |
| ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2 mm+FRPカバー 2. 5mm                | ○     | ○  | ○   | ○  |
| セメントモルタル(無筋)100mm+FRPカバー3 mm 103mm                    | ×     | ×  | ×   | ×  |

(注) ( ) の被覆厚は22年暴露後の観察箇所の実測値または施工直後の測定値(\*)

○：優良、△：可、×：不可

#### 4. 2 施工上の問題点と対策について

##### (1) 施工環境の改善

補修の対象が飛沫部の上部である場合は、塗装が行える気象・海象条件であれば施工上特に問題はないが潮流や波浪が激しい外洋で、飛沫部の下部や干満部の補修作業では、耐久性に優れた良好な防食被覆の仕上がりを得るため、まず、海上が静穏な時期を選ぶことが大切であるが、作業規模が大きい場合は事実上困難であり、人工的に波浪の影響を防ぐバリアを設置し、良好な施工環境で作業できるようにすることが望まれる。

##### (2) 素地調整方法

耐久性に優れた防食被覆の施工には、被覆の劣化を促進する塩分を含んださび層、特に、素地に食い込んださびや、付着生物、劣化塗膜などの補修対象面の付着物の除去が不可欠である。阿字ヶ浦漂砂観測栈橋の既設鋼管杭について行った防食工事では、さび落としをハンマリング+ウエットブラスト工法で行い、作業能率の向上と孔食部のさび、塩分の除去、インヒビター使用による鋼露出面の一時的な防錆を図っているが、補修部分の被覆の劣化状況からウエットブラスト工法を採用した効果が認められるので、廃液処理の徹底による海洋汚濁防止の措置を講じたうえで採用することを推奨したい。

##### (3) 施工方法の改善

飛沫部の上部に塗装を適用する場合には、塗装回数を少なくすること、塗膜厚を大きくすることが長期耐久性の向上に有効であることが明らかとなった。そのためには、一回で厚く塗装できる塗装方法の採用が望ましく、高粘度で速乾性の塗料でも効率的に厚く均一に塗装できる塗装機器の採用を考える必要がある。阿字ヶ浦漂砂観測栈橋での防食工事では、このような考えで新型塗料について、最新の塗装機器による試験施工を行ったが、種々トラブルが発生し十分な膜厚が得られない場合もあった。しかし、塗膜厚の大きいものほど優れた耐久性を示したことから厚膜化の方向は正しかったと思われる。

飛沫部の下部や干満部の防食施工では、波浪の制御をしなくても長期耐久性のある被覆を形成できる防食被覆を形成できる塗料は、少ないことが確認された。

通常の干潮時の環境条件でも施工でき長期耐久性を確認できた防食被覆は、ペトロラタム系被覆のみで、次いで、ある種の性状を有する水中硬化型エポキシ樹脂塗料を5mm程度に厚塗りしたものが良い成績を示し、波浪による塗料の流出防止には、クロス材や金属製ネット材の併用による補強、流出防止対策や養生時の防護用シートの使用等が有効であることが分かりある程度の適用上の見通しが得られた。

しかし、決定的に有効な方法は見当たらなかった。

土木的な防食被覆として採用したセメントモルタル+FRPカバーは、補強鉄筋を使用しなかったため、繰り返し波浪の衝撃を受けて比較的短期間で崩落した。原因はモルタルの硬化収縮に伴い発生したひび割れと、モルタル近傍の鋼管の表面に生じたさびが、モルタル中への塩分の浸透とモルタルの中性化の進行に合わせて、鋼管の表面に沿ってモルタル中にくさびのように侵入し、腐食の進行に伴うさびの膨張圧により、ひびわれを成長させ崩壊脱落させたと考えられる。したがって、耐蝕性のある樹脂塗装鉄筋を使用してセメントモルタルを補強するとともに、硬化収縮の少ない膨張性セメントを使用したモルタルを充填する方法を採用すれば、大幅な耐久性の向上が期待できると思われる。

## 5. まとめ

### 5. 1 補修の必要性

海洋環境では、鋼材の腐食を促進する塩分が多く介在し腐食が激しいため、恒久的な鋼構造施設を建設する場合には、積極的な防食が必要である。

特に、鋼の腐食が著しい飛沫部や、腐食は比較的少ないものの漂流物の衝突や海洋生物の付着等により被覆が損傷しやすく、かつ、補修が困難な干満部については、損傷や劣化を放置すると被覆の劣化を早める傾向があるので早期の補修が必要である。

また、損傷箇所や劣化箇所を補修せずに放置すると、損傷、劣化部が急速に拡大するばかりでなく、腐食が進行して補修時の素地調整が困難になるなど、量的にも質的にも処置が困難になるので、点検による早期発見と早期補修の励行が望ましい。

阿字ヶ浦漂砂観測栈橋の防食鋼管杭における、防食被覆の劣化状況を見ると、防食鋼管杭の運搬、打ち込み工事に伴い発生した被覆の損傷箇所では、被覆の防食特性とも関係するので一概には言えないが、損傷箇所を起点とする腐食の進行につれて被覆の劣化範囲が拡大し初期における被覆の損傷の度合いが、その後の被覆の耐久性を左右する傾向が認められた。これらのことから、長期防食を図るには、被覆の損傷および劣化の規模に応じた補修技術の確立が不可欠であることが分かった。また、被覆下での腐食の拡がりを抑制する性能が小さい被覆ほど劣化が速いので、早期発見、早期補修の必要性が大きいことも分かった。

### 5. 2 補修の困難性

被覆の補修は、海上が穏やかな時期を選んで行う必要がある。飛沫部の上部については、通常の塗装作業に準じて考えれば特に大きな問題はないが、飛沫部の下部、特に、干満部については、その条件は不可欠でさらに、できるだけ潮位が低くなる干潮時を選ぶなど、補修に適した時期の選定は極めて重要である。したがって、恒久的な大規模施設では、防食を重視しできるかぎり補修を必要としない、いわゆるメンテナンスフリーを目指した防食仕様の採用が望まれる。

海中部の防食には、防食対象物の構造によって適用が制限され、一般に建設後の被覆の補修は不可能あるいは極めて困難となるので、当初から適切な防食仕様を採用し可能なかぎり電気防食を併用するのが望ましい。

なお、電気防食は、阿字ヶ浦のように漂砂の激しい環境でも、効果的に鋼管の腐食を抑制し結果的にはサンドエロージョンによる磨耗を軽減する効果も期待できそうなので、被覆の補修ができない場合でも被覆の補修に代えてその採用を検討すべきである。ただし、干満部への電気防食の適用は潮位の低下とともに防食可能な範囲が減少し、とりわけ干満部の上部では十分な効果を得にくいことに留意すべきである。

### 5. 3 防食被覆の工場施工と現地施工の性能比較

防食被覆の現地施工では、種々被覆の耐久性を低下させる要因が多く、調査結果からも工場施工の場合と比較して耐久性に劣ることが明らかとなった。このことは、鋼管杭の場合だけでなく鋼橋の桁でも確認されており、今後、鋼管杭の防食を被覆により行う場合には、工場で製作されたいわゆる防食鋼管杭を採用し被覆の損傷を極力防ぐよう慎重な配慮をしつつ施工すべきである。また、施工後には、被覆の損傷について点検し適切に補修することが望ましい。これにより、各被覆の特性が十分発揮され、確実に長期の供用性を得ることができる。

やむをえず被覆の補修を行う場合は、適用する部位と面積および施工環境条件を考慮し広い範囲を対象とする場合には、できるかぎり施工環境の影響を受けにくいペトロラタム系被覆のような仕様を選定し適用するとよく、対象箇所が局部的なときは、適性のある水中硬化型エポキシ樹脂塗料を用いる仕様を選定し、環境条件に応じて波浪による未硬化塗料の流出防止等適切な養生措置を講じるのがよい。

#### 5. 4 鋼管以外の防食対象面への適用

塗布型防食被覆の場合には、大口径の鋼管のように平面に近い面や完全な平面あるいは凸凹面も防食できるが、ペトロラタム系被覆の場合は、テープを押さえるための反力を得る必要があり鋼矢板に適用する場合のように、スタッドボルトの取り付けと押さえ板等金具の使用および適宜クッション材を使用する等の工夫が必要であり、FRPカバーの板厚増加が必要になる場合も考えられる。

#### 5. 5 補修用推奨防食仕様

補修用推奨防食仕様は、阿字ヶ浦での補修試験結果をベースとしその他多くの試験結果や実績および、その後の補修材料や補修技術の進歩を考慮して選定した。ただし、作業者の健康や安全および近年高まりつつある環境問題についても配慮し、明らかに問題のある材料を使用する防食仕様は排除した。選定した飛沫部および干満部の補修用仕様例を表3.5-1に示す。

補修用推奨防食仕様の特徴は、概略以下のようである。

##### ①エポキシ樹脂塗料下塗+超厚膜型エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m)×3

旧塗膜がエポキシ樹脂塗料系の、腐食による被塗面の凸凹が比較的小さい防食被覆の飛沫部補修用仕様で、エポキシ樹脂塗料下塗ははけ毛塗り、超厚膜型エポキシ樹脂塗料には厚塗り可能な品質の塗料を用いエアレス塗装する。したがって、補修面積が比較的大きく、かつ、着色が必要な場合に適している。部分補修の場合にははけ毛塗りする。

##### ②有機ジンクリッチプライマー+厚膜型エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m)×3

①仕様のエポキシ樹脂塗料下塗を、防錆性の優れた有機ジンクリッチプライマーで置き換えた塗装仕様で、ブラスト処理により旧塗膜を完全に除去する場合に適性があり、活膜上に塗り重ねると有機ジンクリッチ塗膜との付着性が悪く、早期に塗膜層間はく離を生じる恐れがあるので注意が必要である。塗装は、エアレススプレーにより行う。部分補修の場合にははけを用いる。

##### ③ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料(1000 $\mu$ m)

旧塗膜がガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料系の、腐食による被塗面の凸凹が比較的小さい防食被覆の飛沫部を対象とした補修用仕様で、無被覆鋼管杭の現地での防食被覆の施工にも適用できる。塗装は、圧送式エアスプレーにより、ウエット・オン・ウエットの1回塗りで行うこともできるが、その場合は、ウエット塗膜厚の管理に注意が必要である。また、ポットライフが短いので気温や塗料の調合量に留意し塗料の粘度変化に注意しながら施工する必要がある、被塗面に水濡れがある場合に健全な塗膜の形成が困難になるなど施工上の問題点が多い。

##### ④水中硬化型エポキシ樹脂塗料(5mm、波浪による塗料の流出防止対策)

腐食による被塗面の凸凹が顕著な、旧塗膜がエポキシ樹脂塗料系防食被覆の小面積の補修に適している干満部に適用する場合には、防食性や作業性の良い実績ある塗料を選定することが大切で施工に際しては海上の穏やかな時期を選ぶことや、波浪による塗料の流出防止策を講じる等の注意が必要である。塗装は

表3.5-1 補修用推奨防食仕様例

| 素地調整             | 防 食 仕 様                                                | 飛 沫 部 |    | 干 満 部 |      |
|------------------|--------------------------------------------------------|-------|----|-------|------|
|                  |                                                        | 上部    | 下部 | 上部    | 下部   |
| ウェットブラ<br>スト Sa2 | エポキシ樹脂塗料下塗+超厚膜型エポキシ樹脂塗料 (300 $\mu$ m) $\times$ 3       | ○     | ○  | —     | —    |
|                  | 有機ジンクリッチプライマー+超厚膜型エポキシ樹脂塗料<br>(300 $\mu$ m) $\times$ 3 | ◎     | ◎  | —     | —    |
|                  | ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 1000 $\mu$ m                       | △     | △  | —     | —    |
|                  | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料 (波浪による流出対策) 5mm                          | ◎     | ◎  | ◎     | ◎    |
|                  | ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ2mm+FRPカバー<br>2.5mm 4.5mm          | ◎     | ◎  | ◎     | ◎    |
|                  | セメントコンクリート (樹脂塗装鉄筋補強、型枠注入) 20cm                        | ◎     | ◎  | ◎     | ◎    |
| 素地調整不要           | 電気防食 (流電陽極方式)                                          | —     | —  | —, △  | △, ○ |

(注) ◎：適用性優良 ○：適用性良 △：効果が制約される、施工性等に難点がある

—：適用困難または不適当

こて、へら、あるいは手塗り（ウェットハンド法）により、大気中に露出している部分から没水部へと、被塗面の水を押し出すようにし最後にローラーで均一に仕上げる。ガラスクロスを併用したり、金網を被塗面に溶接して水中硬化型塗料を塗装する場合はこてを用いる。この工法は、波浪による塗料の流出防止に効果的で、特に、金網を併用する工法は干満部への施工実績が増加している。

#### ⑤ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ（2mm）+FRPカバー（2.5mm）

飛沫部、干満部ともに適用できる。小口径鋼管杭の方が作業しやすいが、押さえ金具締め付け用のスタッドボルトを取り付ければ、大口径鋼管杭や平面部にも適用可能である。小面積の補修ばかりでなく、施工規模の大きい新設、補修に対しても適用性がある。

ここでは、カバーの品質を、試験に採用したFRPとしたが、その後の研究により更に耐久性の優れたものとして機械締め方式のチタン製カバーが開発されている。しかし、材料が高価なため、板厚が0.4mmと薄いため変形しやすい欠点がある。カバーは、たとえ穴が開いても機能に影響のない程度のものであれ

ば問題ないと考えられるのでチタンより耐孔食性は劣るが、より安価で板厚を増すことのできるSUS316Lクラス程度のステンレス鋼板採用の可能性もあるように思われる。

#### ⑥セメントコンクリート20cm（型枠注入）

型枠を用い、セメントコンクリートを注入する土木的な方法で施工するので、飛沫部、干満部の両方に適用できる。補強に耐蝕性の優れた樹脂塗装鉄筋の採用、硬化収縮の少ないセメントの選定、材料分離防止のための混和剤の使用、コンクリート充填の確認などの注意が必要である。型枠にFRPを使用し取り外さずに保護カバーとして利用する方法もある。補強材としてスチールファイバーを混入したセメントモルタルを用い型枠施工や吹き付け施工する方法もあるが、いずれも施工性が良くない欠点がある。

ここでは、施工性を考慮し被覆の厚みを20cmとしたが、使用材料についての上記注意事項の遵守を前提とすれば、15cm程度の厚みでも良いと考えられる。

#### ⑦電気防食（アルミニウム合金流電陽極方式）

防食原理からも飛沫部には効果がなく、干満部への効果も限定されるが、干満部下部における防食被覆の損傷箇所や劣化箇所からの鋼材腐食の進行を防止する効果がある程度期待できる。

実際上は、鋼構造物の海中部には、多くの場合、電気防食が適用されるため必然的に防食電流が干満部の鋼材露出部にも流入し防食される。

## 第4編 漂砂による鋼管杭の摩耗特性

### 1. はじめに

海岸侵食の対策を講じるためには、砕波帯内外での波の変形特性や流れの特性と、それらに伴う漂砂現象や地形変化を把握することが重要である。そこで、海岸研究室では、茨城県ひたちなか市阿字ヶ浦海岸に漂砂観測用栈橋を建設し、波、流れ、漂砂、地形変化に関する調査を行ってきた(例えば、宇多ほか、1988)。

しかし、漂砂観測用栈橋は、1973年に岸側の100mが1976年に沖側の100mが建設されており、完成後20年以上経ったため近年では老朽化が目立っていた。また、常陸那珂港の着工(1989年～)に伴い、自然な状態の海岸調査ができなくなっていた。このことから、漂砂観測用栈橋を撤去することとし、それを1998年3月27日に終了した。すなわち、阿字ヶ浦海岸での漂砂観測を終えたことになるので、ここではその観測の成果を簡単に報告する。また、撤去した鋼管杭の腐食状況を調査した結果、漂砂海底面部分で摩耗が見られたので、漂砂による鋼管杭の摩耗現象について考察する。

### 2. 阿字ヶ浦海岸における海浜断面変形と漂砂現象

#### 2. 1 海浜断面変形

漂砂観測用栈橋の南側には磯崎漁港が、北側には建設中の常陸那珂港が位置し、栈橋付近では海岸線に対して波がほぼ直角に入射する条件にあった。栈橋は、平均的な汀線に対し直交して設置され、鋼管杭からなる基礎工と鋼材トラスからなる上部工で構成されていた。栈橋を利用した海浜断面の測量などを1週間間隔で継続的に行っていった(橋本・宇多、1976 ; 1977 ; 1978 ; 1979)。

海浜断面形の測量結果の一例を図4.2-1に示す。1986年5月1日～6月12日までの隔週の測量結果から、沖側が深くなり前浜にバームが発達する状況が分かる。このような変形過程と外力の関係に関しては、橋本・宇多(1981a, 1981b)により経験的固有関数を用いて解析され、次の結論が得られている。①第1位の固有関数は沿岸漂砂による地形変化を表す。②第2位の固有関数は波浪の強弱による岸沖漂砂に伴う地形変化を表す。③第3位の固有関数は岸沖漂砂を表すと考えられるが、検証が十分できなかった。④第4位の固有関数は波向変化に対応して生ずる岸沖漂砂を表すと考えられる。

潮位変化に伴う前浜の変形過程などについては、宇多ほか(1988)によって観測が行われている。これは、任意に基

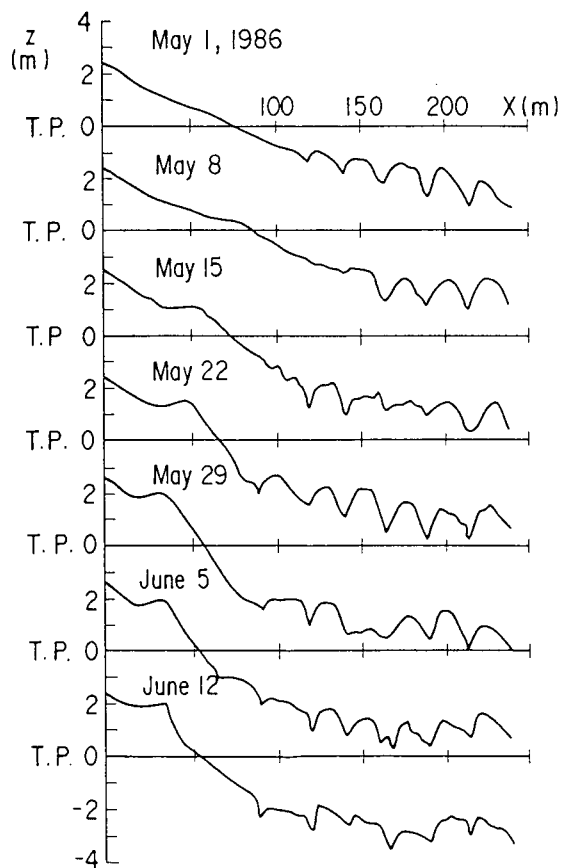


図4.2-1 断面地形の変化の一例

準点を設け、それらの地点の地盤変動と潮位変化、および基準点①から平均潮位における汀線位置まで距離の関係を調べたものである。この調査から潮位変化に伴う漂砂の方向を推定すると図4.2-2となり、干潮から満潮にかけては岸向きの漂砂が、満潮から干潮にかけては沖向きの漂砂が卓越すると考えられている。

## 2. 2 浮遊砂の観測

海浜変形を考える上では、現地海浜における漂砂量の予測が必要とされる。前節では波打ち帯での漂砂機構について、まだ不明な点が多いことを述べたが、砕波帯における漂砂機構については阿字ヶ浦海岸においても観測してきた。特に海浜変形を考える上で重要な役割を果たしている波による底質の浮遊機構について観測を行ってきた。底質の浮遊が発生する機構としては、砕波に伴う斜降渦・水平渦の作用（灘岡ほか，1987；張・砂村，1993）などが考えられている。

1987年にはこの現象に着目して観測を行い（宇多ほか，1988）、図4.2-3のような高濃度の浮遊砂雲の存在を推定した。また、浮遊砂雲の輸送と浮遊砂量については、佐藤ほか（1995，1996）による観測が試みられ、浮遊砂の発生機構等について次の知見が得られている。①来襲する波浪エネルギー

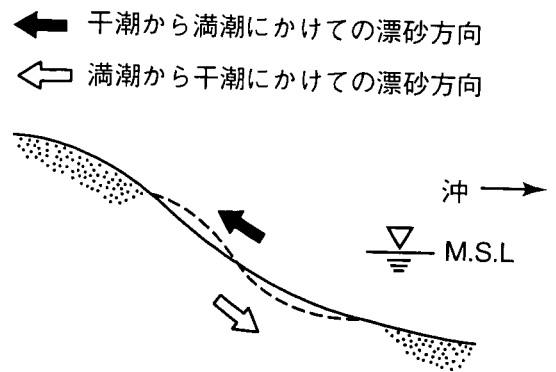


図4.2-2 潮位変化に伴う漂砂の移動

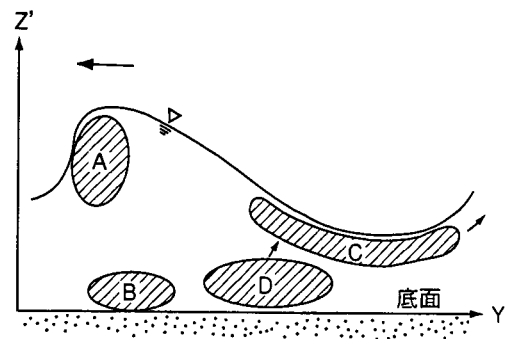


図4.2-3 破碎帯内での浮遊砂雲の分布

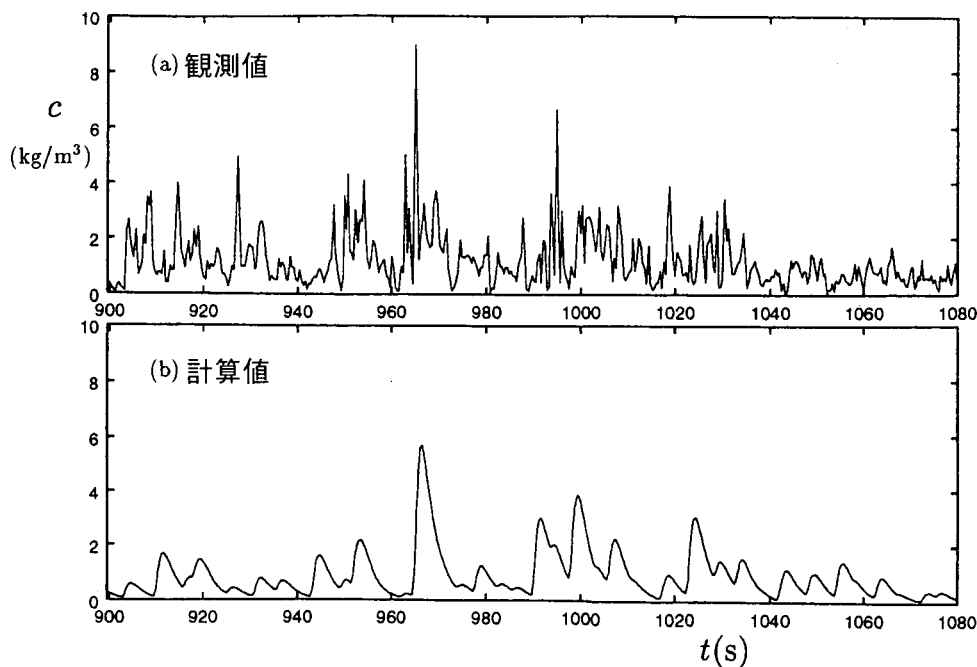


図4.2-4 浮遊砂濃度の観測値と計算値との比較

ギーが大きい時に浮遊砂濃度も高くなる。このような場合、長周期変動による浮遊砂の輸送は冲向きである。②浮遊砂濃度は直前の波の底面摩擦応力と相関がある。③浮遊砂濃度の長周期変動は拡散方程式を用いたモデルで評価できる(例えば、図4.2-4)。④浮遊砂の巻き上げは、砕波帯外では波群の通過に対応して発生し、砕波帯内では砕波による乱れの発達と対応して発生する。

## 2. 3 砂層厚の推定

栈橋の撤去にあたり、1996年に事前調査を行った結果、次のことが指摘された。①鋼管杭は、約20年間厳しい海象条件に曝されていたため腐食が進んでおり、飛沫帯から海底面にかけての部分で腐食が著しい。②鋼管杭は、硬質粘土層(N値が40以上)に十数m打ち込んであり、約20年間の経過に伴い鋼管杭と硬質粘土層の間の粘着性が大きくなっていると推定される。③このため、鋼管杭を全撤去するとすれば、過大な引張り応力がかかり、脆弱な部分で破断してしまう可能性が高い。

そこで、鋼管杭を引き抜くときの引張り応力を小さくするために、硬質粘土層内のある部分で人為的に切断し確実に撤去することとした。このために、図4.2-1に示した測量結果から、経年的な平均海浜断面形状と硬質粘土層面を推定した。阿字ヶ浦海岸では栈橋を延伸する際に、海底地盤のボーリング調査が行われ、砂層の下に硬質粘土層が存在していることが確認されている。これと図4.2-1に示したような長期にわたる海浜変形から各地点の過去の最洗掘深を拾い出し、それを縫絡して推定硬質粘土層の上面とした(図4.2-5)。

実際に漂砂観測用栈橋を撤去した際の引抜いた鋼管杭の表面の状況から硬質粘土層および砂層厚を調べた。なお、鋼管杭の切断は、推定硬質粘土層より1.7~2.2m深いところで行えたことが、引抜いた鋼管杭に付着していた粘土から確認できた。撤去した鋼管杭の内部を調査した結果によれば、海底面近くには淘汰の良い砂が、中間部には礫、砂、粘土の混在した底質が、海底面から数m深いところには粘土があった。鋼管杭内では底質の腐食や化学的変化は生じていないことと、地形変化等から推定した硬質粘土層が存在することが確認された。

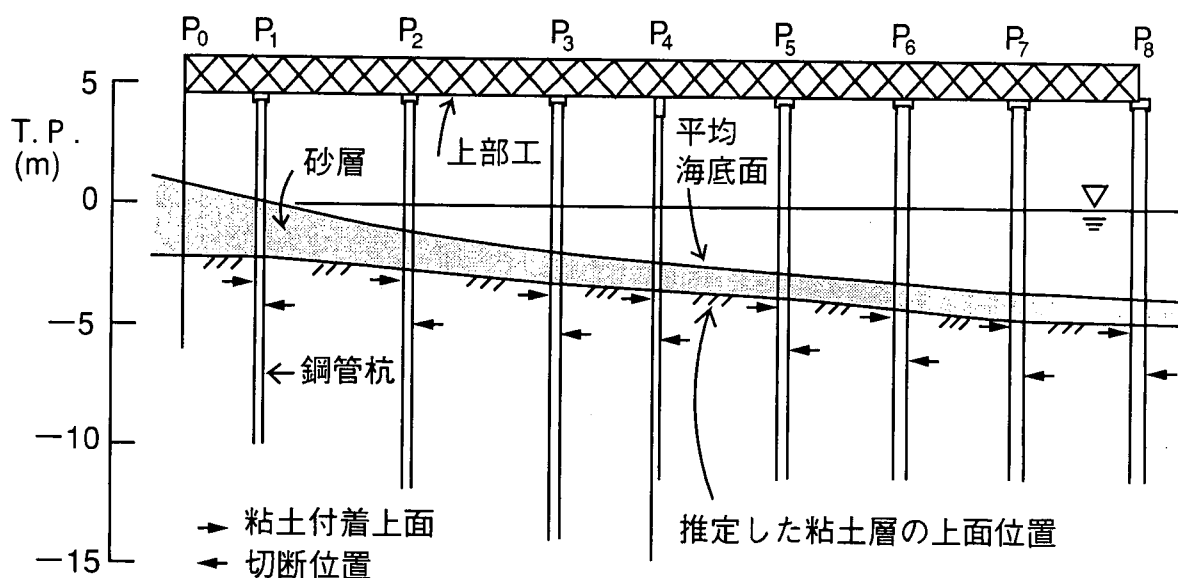


図4.2-5 栈橋に沿う砂層と粘土層

### 3. 漂砂による鋼管杭の摩耗状況

#### 3. 1 鋼管杭の摩耗状況

鋼管杭の調査結果については、第2, 3編で詳細に述べている。ここではそのデータの一部に着目する。図4.3-1は基準点から240m離れたPs 9のNo. 1の鋼管杭の摩耗量であり、縦軸に標高を、横軸に約20年間の摩耗量をとっている。T.P. 0～3mで摩耗量が著しく大きくT.P. 2mで約7mmになっている。T.P. 0～-7mでは摩耗量は1mm以下と小さい。しかし、T.P. -3mで摩耗量がやや大きくなっている。Ps 9のNo. 9'の鋼管杭の防食をしていない部分の摩耗量を図4.3-2に示す。T.P. -4.5m以下は調査しておらず、T.P. -2.5以上は防食されていたため調査していない。T.P. -3.5m, -3.2mに摩耗量約7mmのピークを持つ摩耗特性を示す。

基準点から141m離れたPs 5のNo. 2の鋼管杭の防食をしていない部分の摩耗量を図4.3-3に示す。T.P. -3.5m以下では摩耗量は1mm未満と小さく、T.P. -3.2mで約4mm, T.P. -2.9mで約6mmと摩耗量は大きくなる。Ps 5のNo. 1'の鋼管杭の摩耗量を図4.3-4に示す。陸側(□印)の摩耗特性はほぼNo. 2の鋼管杭と同様であるが、海側(●印)では摩耗がT.P. -3.2m, -2.9mでも小さい。Ps 9のNo. 1, No. 9', Ps 5のNo. 2の鋼管杭では陸側(□印)と海側(●印)の摩耗特性にほとんど違いは見られなかったが、Ps 5のNo. 1'の鋼管杭で陸側と海側に摩耗特性の違いが生じた原因は不明である。

Ps 9のNo. 1', 7', 8', 9'の4本の鋼管杭には、長さ2m, 管径914.4mm, 肉厚16mmの鋼管(ガードリング)が取り付けられてあった。なお、ガードリングには防食は施されていない。これら4個のガードリングは、Ps 9の鋼管杭撤去時にはずれてしまったため、鋼管杭との対応と位置が不明となった。ガードリングの2個について摩耗量の調査を行った結果を図4.3-5, 6に示す。No. 1では0～2.0mにおいて、1点を除いた計測点で3mm以上の摩耗量となり、最大では7.5mmと摩耗が大きいことが分かる。No. 2ではZ=0～1.5mにおいて、摩耗量が5mmを超えており摩耗が大きい。

#### 3. 2 鋼管杭周辺での地盤変動

防食の施されていない鋼管杭は、海底面付近での砂粒子の

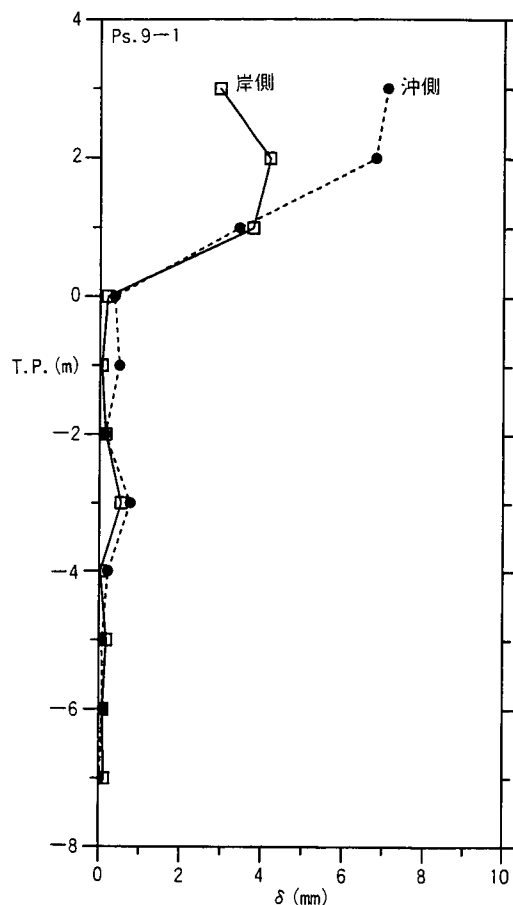


図4.3-1 Ps 9のNo. 1の鋼管杭の摩耗量

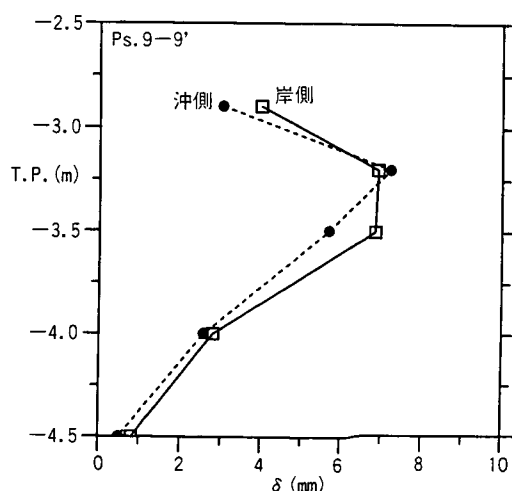


図4.3-2 Ps 9のNo. 1'の鋼管杭の摩耗量

移動によって錆びた表面が削られると考えられる。そこでPs 9とPs 5付近の海底面の変動を調べた。図4.3-7にはPs 9の位置する基準点からの距離240m地点の海底面の変動を、縦軸に標高をとり、横軸を時間軸として示した。海底面の測定は第2章で述べたように1週間間隔で行った。図4.3-7によると海底面の変動は著しく、T.P.-2.5~-5.0mの間で変動していることが分かる。この変動をもとに海底面の位置の頻度分布を求めた(図4.3-8)。240m地点では海底面の位置の頻度は、T.P.-2.0~-5.5mの間で-4m付近にピークを持つ分布形を示す。同様にしてPs 5の位置する141m地点の海底面の位置の頻度分布を求めたのが図4.3-9である。141m地点では海底面の位置の頻度は、T.P.-0.5~-4.0mの間で-2.0m付近にピークを持つ分布形を示す。

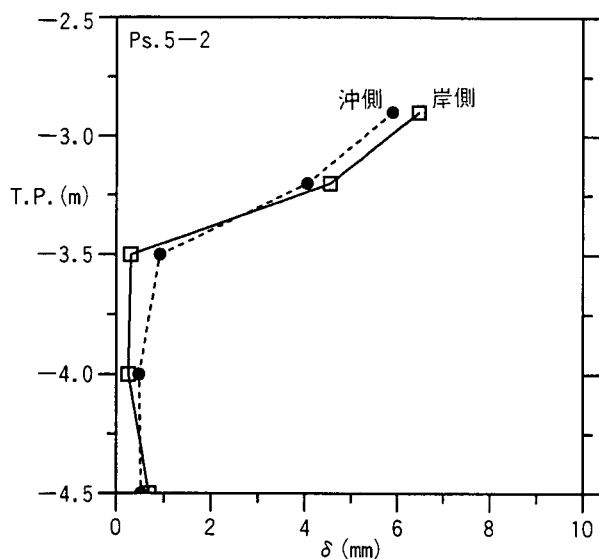


図4.3-3 Ps 5のNo. 2の鋼管杭の摩耗量

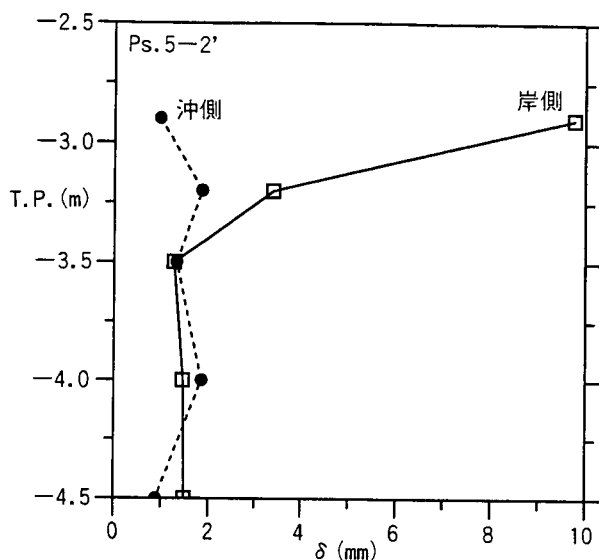


図4.3-4 Ps 5のNo. 1'の鋼管杭の摩耗量

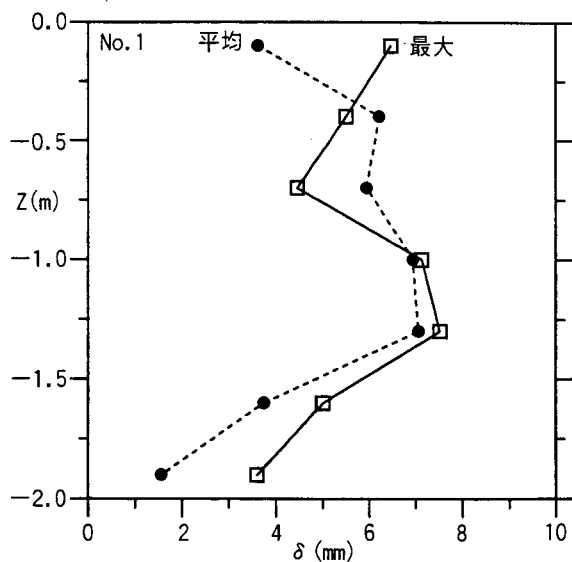


図4.3-5 No. 1のガードリングの摩耗量

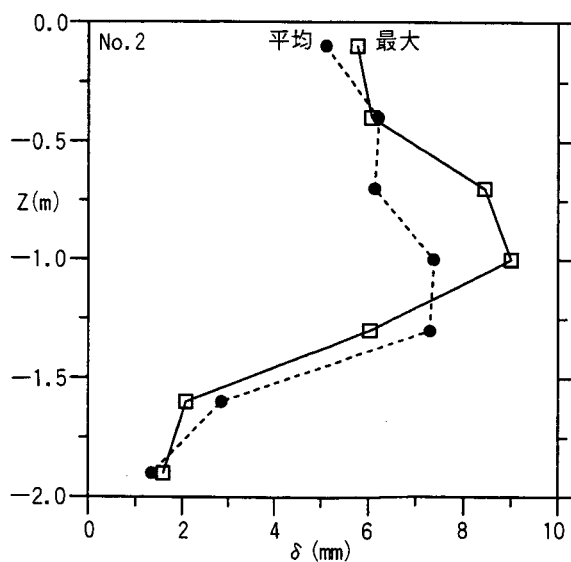


図4.3-6 No. 2のガードリングの摩耗量

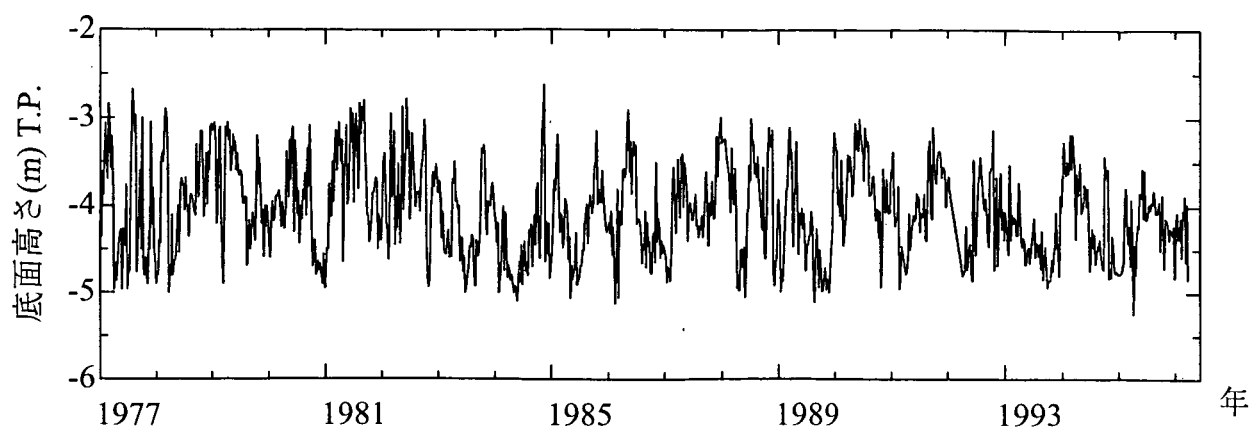


図4.3-7 基準点から240m地点の海底地盤の変動

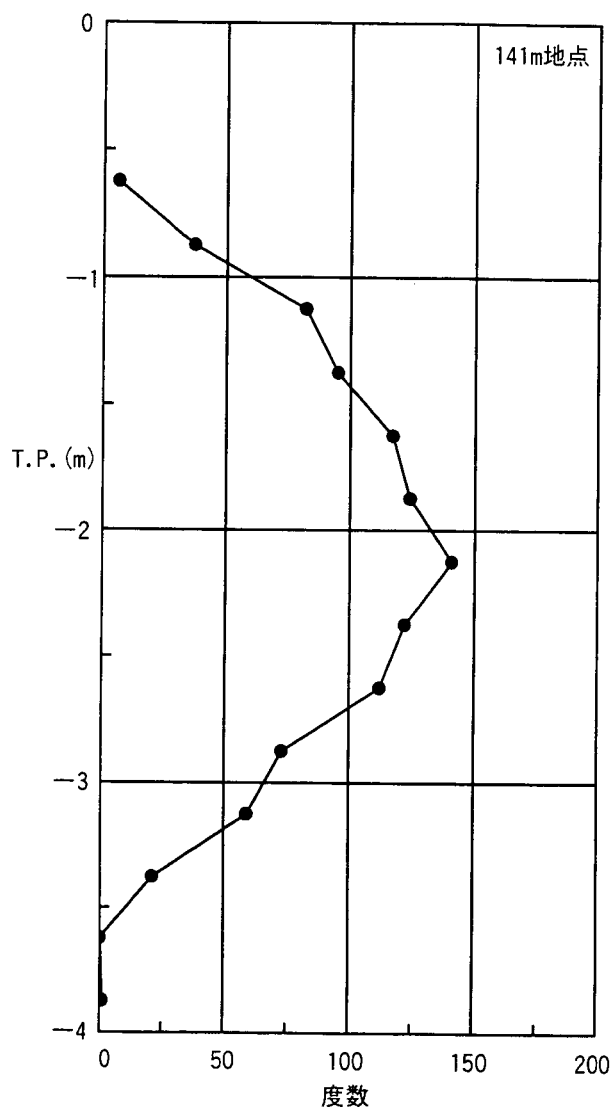
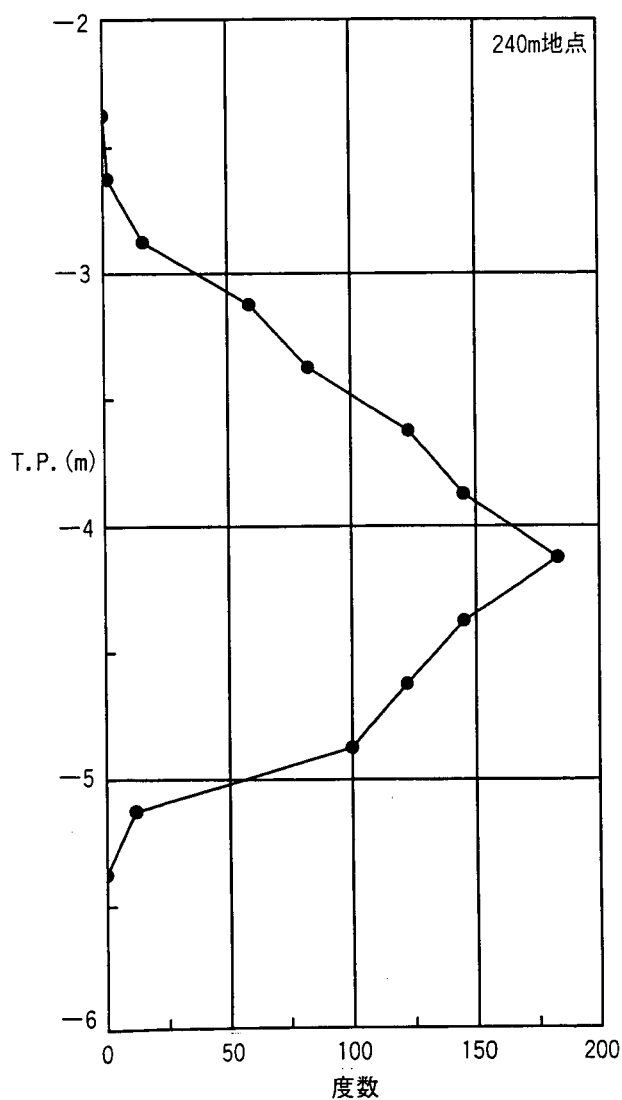


図4.3-8 基準点から240m地点の海底地盤の出現頻度 図4.3-9 基準点から141m地点の海底地盤の出現頻度

### 3. 3 漂砂による鋼管杭の摩耗に関する考察

海岸における漂砂による鋼管の摩耗特性については、数例の研究(山下ほか, 1989 ; 1990 ; 1991 ; 1992)がなされているのみである。これらの研究によれば、粒径が1 mm以下の砂では砂の衝突エネルギーは非常に小さく、浮遊砂の衝突による摩耗はあまり発生しないと推定されている。阿字ヶ浦海岸の底質の平均粒径は1 mm以下なので、錆びない鋼管杭には漂砂による摩耗はほとんど生じないことになる。

防食が施されていない鋼管杭は一旦錆びて層状の腐食生成物(さび層)を形成し、底質が衝突しない部分ではその上に生物等が付着して摩耗は進行しないと考えられる。一方、底質が衝突する部分では、高波浪時の底質の衝突により脆い錆層が剝離されて鋼素地が露出し、静穏なときに再び錆びて、さらに高波浪時の底質の衝突による錆膜の剝離を繰り返して摩耗が進行すると考えられる(図4.3-10)。このような摩耗の過程は防食を施していない鋼管杭を基礎とした有脚式離岸堤の摩耗状況を示す写真4.3-1(p25)からも推定できる。

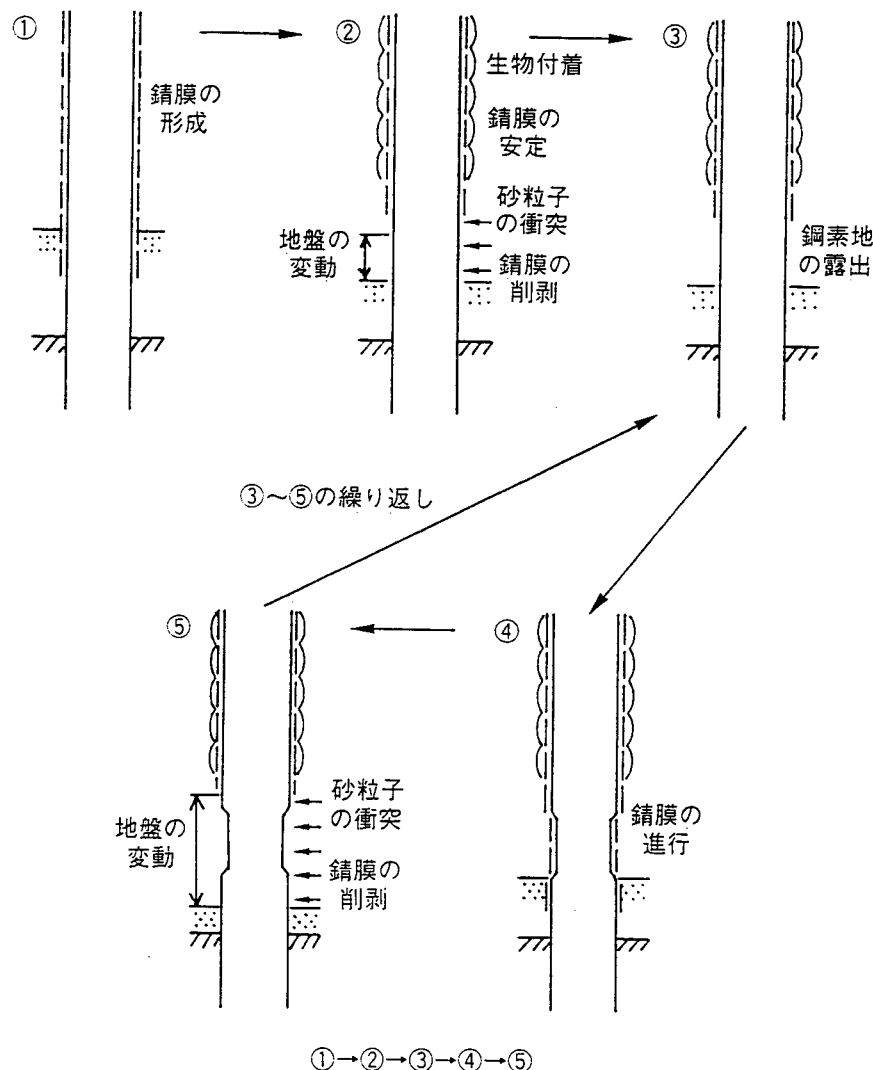


図4.3-10 漂砂による鋼管杭の摩耗機構

図4.3-10の摩耗過程をもとに、図4.3-1～6に示した防食を施していない鋼管杭の摩耗量と、図4.3-7～9に示した海底面の変動を比較すると次のことが分かる。

①基準点から240m離れたPs 9 では、海底地盤の変動はT.P.-2.5～-5.0mにあり、鋼管杭の摩耗はT.P.-2.5～-4.5mで生じており、海底地盤の変動領域と鋼管杭の摩耗範囲は良く対応している。

②Ps 9 での海底地盤の最も多い位置はT.P.-4.0mで、鋼管杭の摩耗の最大位置はT.P.-3.0～-3.5mで海底地盤の位置の頻度分布形と鋼管杭の摩耗の分布形には相関がある。

③基準点から141m離れたPs 5 では、海底地盤の変動はT.P.-0.5～-4.0mにあり、鋼管杭の摩耗はT.P.-3.5m以浅で生じており、海底地盤の変動領域と鋼管杭の摩耗範囲は良く対応している。

④Ps 5 での海底地盤の最も多い位置はT.P.-2.0mで、鋼管杭の摩耗の最大位置はT.P.-3.2mであり、海底地盤の位置の頻度分布形と鋼管杭の摩耗の分布形には相関がある。

⑤Ps 9 に設置されていたガードリングは一旦T.P.-5.5mまで沈み込んだと仮定すれば、海底地盤の変動がT.P.-2.5～-5.5m以浅で生じていることから、2mの長さ全体がまんべんなく砂の衝突により摩耗作用を受けたと推定される。

⑥Ps 9 のNo. 9'のT.P.-4.0mの摩耗量(約3mm)と、ガードリングの平均的な摩耗量(約6mm)を加算して最大摩耗量を推定すると約9mmとなる。阿字ヶ浦海岸における水深2.5～5.5mでの漂砂による最大摩耗量は、少なくとも10mm(摩耗速度に換算して約0.5mm/yr)となる。なお、この摩耗速度は鋼管杭の鋼素地の鍍層の厚さと鍍速度に依存すると考えられる。

⑦Ps 5 の摩耗量の分布形と海底地盤面の頻度分布から、阿字ヶ浦海岸における水深0.5～3.5mでの漂砂による最大摩耗量は、水深2.0m付近で大きく見積もって20mm(摩耗速度に換算して約1mm/yr)になると推定される。一般に海底面での流速は浅い方が速いので(例えば、佐藤ほか, 1996)、Ps 9 の10mmより大きい値となる。

#### 4. おわりに

第2章では、阿字ヶ浦海岸における漂砂観測用栈橋を利用した波、流れ、漂砂、地形変化に関する現地観測で得られた知見の一部を紹介した。実際にはこの他にも地球規模の気候変動と地形変化との関連や、砂丘の変形などに関する観測結果(例えば、宇多ほか, 1993; 外崎ほか, 1993)もある。また、阿字ヶ浦海岸においての現地観測と、リモートセンシングの情報の比較による海象の把握の試みも行ってきた(宇多ほか, 1983)。さらに、1990年以降の地形変化と外力条件との関係の解析により、常陸那珂港の阿字ヶ浦海岸への影響についての検討を進める必要がある。

第3章では、阿字ヶ浦海岸における鋼管杭の漂砂による摩耗について考察した。山下ほか(1989, 1990, 1991, 1992)によれば、粒径が1mm以下の砂では砂の衝突エネルギーは非常に小さく、浮遊砂の衝突による摩耗はあまり発生しないと推定されており、阿字ヶ浦海岸の底質の平均粒径は1mm以下であることから、鋼管杭に鍍が生じない場合は漂砂による摩耗はほとんどないと考えられる。一方、鋼管杭に鍍が生じる場合には、図4.3-10に示す機構により海底地盤の変動に対応した砂の衝突に伴う摩耗が生じ、水深によっては最大で1mm/yrの速度の摩耗が生じる可能性を指摘した。このことから、漂砂の活発な海域で鋼管杭を利用す

る場合には、鋼管杭に錆が生じないように防食を施す必要が指摘される。

漂砂観測用栈橋を海洋構造物としてみた場合、基礎工の鋼管杭は防食実験の試験体でもあり、現在、詳細な外観調査や物性調査が行われており(第2, 3編)、その結果から鋼管杭基礎の有脚式離岸堤の評価を行うにあたっての貴重な知見が得られると考えられる。そして、その知見は、駿河海岸, 蒲原海岸, 下新川海岸などに設置された鋼管杭(写真4.3-1)を基礎工とする有脚式離岸堤の耐久性や安全性の評価に利用できる。

## 参考文献

- 宇多高明・竹渕 勉・橋本 宏(1983): リモートセンシングによる海浜流と波向の観測, 第26海岸工学講演会論文集, pp.475-479.
- 宇多高明・小俣 篤・竹渕 勉・齋藤友伸(1988): 前浜地形変化と碎波帯内における浮遊砂の発生・輸送機構に関する現地観測報告書, 土木研究所資料, 第2672号, 62p.
- 宇多高明・伊藤弘之・岩崎福久(1993): 地球規模の気候変動と阿字ヶ浦海岸における長期的海浜変動との関連, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.426-430.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・山本幸次(1995): 碎波点付近における浮遊砂の現地観測, 土木学会論文集, No.521/Ⅱ-32, pp.135-144.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・加藤史訓(1996): うねりによる長周期変動と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No.551/Ⅱ-37, pp.101-111.
- 張 達平・砂村継夫(1993): 碎波帯における底面到達渦に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.61-65.
- 外崎公知・五十嵐康之・宇多高明・岩崎福久・畑中達也(1993): 阿字ヶ浦海岸における砂丘の発達と変形, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.286-290.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行(1987): 碎波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.21-25.
- 橋本 宏・宇多高明(1976): 阿字ヶ浦海岸における海浜過程(第1報), 第23海岸工学講演会論文集, pp.245-249.
- 橋本 宏・宇多高明(1977): 阿字ヶ浦海岸における海浜過程(第2報), 第24海岸工学講演会論文集, pp.216-220.
- 橋本 宏・宇多高明(1978): 阿字ヶ浦海岸における海浜過程(第3報), 第25海岸工学講演会論文集, pp.269-273.
- 橋本 宏・宇多高明(1979): 碎波帯における波浪・海浜流・潮汐・地形の相互関連について, 第26海岸工学講演会論文集, pp.157-161.
- 橋本 宏・宇多高明(1981a): 経験的固有関数による海浜地形変化の解析, 土木学会論文報告集, 第305号, pp.59-71.
- 橋本 宏・宇多高明(1981b): 海浜地形と外力の動的応答関係について, 土木学会論文報告集, 第310号, pp.77-87.

- 山下俊彦・佐伯 浩・浅川典敬・佐藤光一・仮屋園義久(1989)：漂砂による鋼管の摩耗に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol.5，pp.109－112.
- 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久(1990)：漂砂による重防食鋼管杭の摩耗特性に関する研究，海岸工学論文集，第37巻，pp.394－398.
- 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久(1991)：漂砂による重防食鋼管杭の摩耗特性と砂粒子の衝突エネルギーに関する研究，海洋開発論文集，Vol.7，pp.231－236.
- 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・染矢武彦・佐藤光一・仮屋園義久(1992)：粒径・管径の効果に着目した漂砂による鋼管の摩耗特性，海岸工学論文集，第39巻，pp.481－485.

## 第5編 鋼管杭の曝露試験結果の総括

### 1. 新設用防食鋼管杭について

#### 1. 1 阿字ヶ浦での曝露試験結果

波浪の激しい特殊環境下で、しかも飛沫部の上端から下端までの範囲が極めて広い条件下で、試験用防食鋼管杭の防食被覆の上端部が飛沫部の真ん中に来て、端部が露出するという特異な条件下での試験であったので、いわゆる促進試験的な曝露試験となった。

すなわち、この曝露試験結果でよい結果が得られた防食被覆は、激しい海象条件のもとで20数年の耐用が可能な防食被覆であるという実証が得られたこととなる。

また、曝露試験で得られた知見は、今後の防錆防食技術の進歩と実用化にあたって得難いデータであると同時に、現在の技術で当時の技術を振り返ると20年間の技術の進歩は著しく、部分的には改良すべき点もあった。したがって、これらの点を改良すればより耐久性のある防食被覆とすることができると考えられる。

#### (1) 環境設定について

海域で上下方向の環境を区分する場合、事前に現地海域の海象潮流、波高等を調べることは当然であるが、構造物の形状や設置方法等を設計図書に基づき十分検討し、現地事情にマッチした区分をする必要がある。

一般に、飛沫帯・干満帯の表現で環境区分されているが、阿字ヶ浦は数波に1波は来るという高波が沖に突き出ている栈橋の鋼管杭に激突して砕波し、しぶきが風に乗って海岸方向の隣接鋼管杭はもとより栈橋上部工にまで達するという構造であったため、「帯」の概念を離れていると考えられたので飛沫部・干満部と表現したが、栈橋構造の設計上の制約がありそのため防食被覆端末を飛沫部の中に設定せざるを得なかったものである。

#### (2) 同一環境区分での防食被覆について

飛沫部用防食被覆の被覆範囲は、飛沫部環境を十分カバーし余裕をもたせる範囲とし、同一環境中に違う防食被覆との境目を設定してはならない。

今回、試験用防食被覆の飛沫部の範囲は、栈橋構造上の制約から上端部の高さをT.P. + 4.3mとしたが、砕波がそれより上部に達し乾湿を繰り返す結果となった。そのため、とくに端部の密封処理がない超厚膜型の防食被覆の上端部から腐食原因物質の浸透を許す結果となり、素地が発錆する結果となった。

#### (3) 被覆の端部処理について

飛沫部環境中で異種の防食被覆を設計せざるを得ないときは、各防食被覆の端部接合部は相互に補完しあうような措置を講じなければならない。

今回の試験で、特にコンクリート+FRPカバーや、ポリエチレンライニング等の超厚膜被覆にあっては、上端の防護処理を施していなかったため雨水海水の浸透を容易にしたことに鑑み、同一環境での端部処理とくに上端の処理の重要性が明らかとなった。

#### (4) 金属被覆材の使い方について

鋼管杭に使われる炭素鋼の自然電位と異なる電位を有する金属を防食被覆材として使用する場合は、炭素鋼への十分な防食手段を講じないと異種金属接触腐食が生じて炭素鋼が急速に腐食することになるので、絶縁などの対策を講じることが必要である。

一般に、金属の巻き付け、クラッド、溶射を問わず、炭素鋼との電位が異なれば、電解質溶液中では電流が発生し、鋼管杭の自然電位より卑であれば杭への防食電流となるが、貴であれば杭への腐食電流となり、いずれの場合でもどちらかの金属が消失することとなるのでマクロ電流の発生を止める必要がある。今回の試験では、特別な対策を講じなかったため異種金属接触腐食が発生していた。

#### (5) 長期耐用性について

防食被覆材を的確に選択し適切な施工を行えば20年以上の長期耐用が期待できる。

今回の試験結果より、外部からの衝撃部周辺や上端部浸透部分を除き防食被覆が健全であった被覆仕様は、環境遮断・波浪衝撃・摩耗等に耐え、長期の防錆防食が確保されていることが判った。すなわち、すでに20年

以上の曝露期間を経過していることから、さらに数年以上の耐用期間が延長できることが推定される。

#### (6) 工場施工について

防食被覆を施工する場合は、現地組立に伴う接合部以外は工場施工を基本とすべきである。塗覆装の施工は、塩分や水分をきらう材料が多いので、現場海域での施工でなく施設の整った工場での施工とすれば、塗布・貼りつけ・接着・ポットライフ等各防食材料に求められる要求事項が満足できる。

##### 1. 2新設用防食被覆について

飛沫部・干満部についての防食塗覆装に関しては、平成2年(1990)8月に「海洋鋼構造物の防食指針・同解説(案)(飛沫部・干満部編)」として提案されている。これは、東京湾千葉沖の試験、阿字ヶ浦での曝露試験の途中経過状況等の知見に基づいて提案されたものである。したがって、20年以上の曝露試験結果は、この指針案見直しのための資料となる。

今回の試験結果およびこれまでの各種試験(例えば、駿河湾試験、東京湾試験等)の結果を加味して検討した新設用防食仕様例と適用性を表5.1-1に示す。

表5.1-1 新設用推奨防食仕様例と適用性(飛沫部・干満部)

| 種 類           | 防 食 仕 様                                | 耐用年数 | イニシャル<br>コ ス ト | 適用実績 |
|---------------|----------------------------------------|------|----------------|------|
| 塗 装           | 有機ジンクリッチプライマー+超厚膜型エポキシ樹脂塗料             | ○    | ◎              | ◎    |
|               | 有機ジンクリッチプライマー+ガラスフレーク入り樹脂塗料            | ○    | ◎～○            | ○    |
| 有機ライ<br>ニ ン グ | ポリエチレンライニング                            | ◎    | ◎              | ◎    |
|               | ポリウレタンゴムライニング                          | ◎    | ◎              | ◎    |
| 複合防食          | ペトラタムテープ+保護カバー(FRPまたは耐食金属)             | ◎    | ○～△            | ◎    |
|               | セメントモルタルコンクリート(鉄筋補強)+保護カバー(FRPまたは耐食金属) | ◎    | ○～△            | ◎    |
| 耐食金属<br>被 覆   | 耐海水性ステンレス鋼                             | ◎    | △              | △    |
|               | 高耐食金属(チタン等)                            | ◎    | △              | △    |

(注) 耐 用 年 数 : ◎ (30年以上), ○ (20～25年程度)

イニシャルコスト: ◎ (安価), ○ (中位), △ (高価)

適 用 実 績 : ◎ (多い), ○ (中位), △ (少ない)

ただし、適切な端部処理および設置後、損傷部の適切な補修を行うことを前提とする。

##### 1. 3防食被覆

###### (1) 塗装

エポキシ樹脂塗料系では、一部に漂流物によるとみられる傷等から発錆がみられたが、塗膜電気抵抗 $106\Omega$ 以上、 $\tan\delta > 1$ と良好であり、被覆はく離後の鋼素地面では若干の点錆がみられる程度であった。総 膜厚

は他の試験結果でも1mm前後のものは良好な結果を得ているので、重防食塗装として厚膜化するほうがよい。近年、腐食因子の透過をより抑制することを期待して環境遮断型塗料の厚膜化の研究が進んでいる。

有機ジンクリッチプライマー+超厚膜エポキシ樹脂塗料の系で総膜厚2~3mm程度の塗装系が用いられる例が多い。これは、補修困難な飛沫部・干満部であるため、メンテナンスフリーを目指した長期間耐食性に優れた防食材が求められているためである。また、長期耐食性を確保するため、塗装と電気防食を組合わせた防食法が普及しつつある。無機ジンクリッチペイントは、有機ジンクリッチプライマーより防食性に優れているが、超厚膜化した場合塗膜の凝集力が小さいため十分な接着力が得られないので除外した。

塗装系は、一般に耐衝撃性に劣るため漂流物の多い内湾環境などでは、傷を生じ結果的に防食寿命を低減させないように、漂流物、船舶の接岸、当て傷の発生状況を予測して適用する必要がある。ガラスクロス併用は、ガラスクロスのないものに比較して外傷が少なく併用の有効性が認められた。

塗装系では、腐食因子の浸透を遅くするため厚膜化するため、層間にガラスクロスを挿入したりガラスフレークを塗料に混入することがある。しかしながら、これらの材料は、塗料とのなじみが良くはく離しないことが必要である。今回の調査では、ガラスクロス入り塗装において塗料との付着性や施工性がやや不満足なものがあつた。今後、これらの性能が改善された材料で再度評価する必要がある。

## (2) 有機ライニング

ライニング系は、端部からの浸透や施工傷からのはく離で一部発錆がみられたが、被膜は電気抵抗 $106\Omega$ 以上、 $\tan\delta > 1$ 以上と良好であつた。ただ、ポリエチレン材は健全であつたが、端部処理がされていなかったため、ポリエチレンと鋼表面とを密着させるために使用した粘着剤が、外部環境と直接接触して粘着剤としての効果を失ったことが考えられるので、十分な端部処理を行うことが不可欠である。最近では技術開発が進み、粘着剤に替えて改良された接着剤が使用されており耐久性が向上している。

ポリウレタンゴム使用は、施工傷から一部積層部の層間がはがれているものがあつたが、密着強度を向上させれば長期の使用が可能であると思われる。

現在は、ポリウレタンゴムはポリウレタンエラストマーライニングに改良され、ポリエチレンライニングとともに鋼管杭防食被覆の主流になっている。また電気防食と併用されることも多い。耐衝撃性を有しており傷が付きにくい、施工時や船舶接岸時の衝撃で傷が付いた場合には海水の浸入を早い段階で防ぐため、適切な補修が必要である。

有機ライニングは、海底付近に漂砂による耐摩耗対策には最適である。

## (3) 複合防食(石油ワックス系材)

ペトロラタム材は、軟粘状材料であるのため波浪その他の衝撃でたやすくはがれやすいので、波浪などから保護するため、外側をFRPまたは耐食金属(ステンレス・チタン)などでカバーして保護する必要がある。波浪や潮流などの外力を受ける海域における保護カバーの取付けは、強固な取付けを行う必要がある。

石油ワックス系材料は、材料自体は長寿命が期待できるので、そのはがれや流出を防止するために外側に用いる防護材は目的に応じて選定することが必要である。

## (4) 複合防食(セメントコンクリート)

セメントコンクリートは、土木用材料として鋼材とともに主要な材料である。今回の試験からも塩分浸透が少なく、十分な厚みがあれば塩分浸透に対抗できるとの報告もあるが、FRPや犠牲鋼板と鋼管杭間の充填材として用いるときは、コンクリートと鋼表面との密着やはく落防止のため鉄筋挿入等を行うことが必要である。また、保護カバーの確実な固定と端部処理も必要である。

良好なコンクリートを打設するためには、十分な管理のもとでコンクリートは施工されることが重要である。このため、コンクリートは工場で施工して現場へ運搬して杭を打設することが望ましいが、杭運搬時や打設時の打撃などによるコンクリートのひび割れなどについて十分な検討とその対策を行う必要がある。

## (5) 耐食金属被覆

常時没水部では自然電位の違いによる異種金属接触腐食が発生する恐れがあるので、その対策を講じなければならない。また、ステンレス鋼ではすき間腐食の発生が懸念される。常時没水部にあっては、電気防食

と併用することが望ましい。

自然電位を十分理解して、その対策を講じて使用すれば長期防食が得られるが、環境によって使用を限定される特殊な金属材（例えば、耐海水鋼、耐候性鋼）は、干満部から飛沫部など環境を跨ぐ構造物への適用を避けたほうがよい。

## 2. 鋼管杭の補修について

### 2. 1 阿字ヶ浦での補修試験結果

#### （1）現場作業の困難性

阿字ヶ浦海岸の砂浜と波打ち際での補修作業であったので、

- ・補修時発生するブラスト屑や廃材の処置が厳しく制限された。
  - ・飛沫部干満部用の補修材を、塩分雰囲気中での現場作業で材料の混合・配分等を行うので、海水飛散・飛砂等を防ぐ段取りが必要であった。
  - ・波浪等外力の影響で固結前剥落、軟粘材溶けだし、破損、塗膜厚不均一等が発生した。
- 等の事態が生じ、天候風雨に左右され、困難な作業であった。

#### （2）補修用防食被覆材について

曝露試験開始時、補修に適する防食被覆材約20種類を選定して曝露したが、20年経過後、調査する対象に値した防食被覆材は、約半数の9種類であった。残余は、波浪風雨の影響で初期の目的が達成できず、鋼管杭の腐食の進行を防止できなかったものである。

- ・鋼素地の除錆後清水で洗浄しても、一時的であるため、海水を封じ籠めて塗装することが前提となるので、それに適応できるものがよい。（ブラスト後も海水雰囲気の中にある。）
- ・塗装系では厚膜化がよい。（ガラスフレーク入あり）
- ・腐食が進み、被塗面の凹凸が著しい場合が多いので水中硬化型がよいが、固結まで時間があるので留意する必要がある。また、売薬の貼りつけ湿布剂的形状にするとか施工に工夫が必要である。
- ・石油ワックス系は軟粘性のためいかなる形状にも対応追従でき、十分な防食効果が期待できる。しかし、表面を防護しなければならないので防護材の選定が重要である。
- ・波浪海域でのFRP（石油ワックス材の保護材）の強度、緊結用ボルトの品質と強度等今後検討を要する。

### 2. 2 補修用防食仕様の作成

現在、新設用の防食仕様は、多くの公共機関で指針・基準・マニュアル等の形で設定されており、使用例も多い。しかし、補修時のみの防食仕様は、新設の系と同等の系という程度で特段の定めがないほうが多い。

そこで、20年を超える曝露試験を経て得られた知見、およびこれまで積み重ねてきた知見に基づき、補修用防食方法として推奨仕様を作成した。

なお、補修作業性や防食性のほか、作業者等の安全衛生と環境への影響を考慮しタールエポキシ樹脂塗料のような発癌性物質を含む材料を用いる防食仕様は排除した。

参考とした各曝露試験を以下に示す。

1. 昭和45年(1970) 7月 淡路島岩屋田之代沖での塗覆装試験
2. 昭和47年(1972) 4月 東京湾浮島沖・木更津沖での曝露試験
3. 昭和50年(1975) 2月 東京湾千葉沖での曝露試験
4. 昭和51年(1976) 2月 阿字ヶ浦での曝露試験
5. 昭和59年(1984) 3月 駿河湾大井川町沖での曝露試験

### 2. 3 補修用推奨防食仕様例

#### 2. 3. 1 部分的な損傷・劣化部の補修用推奨防食仕様

被覆の部分的な損傷や劣化に適用する場合の部の推奨防食仕様を表5.2-1 に示す。

表5.2-1 部分的な損傷・劣化部の補修用推奨防食仕様例

| 記号 | 防 食 仕 様        |                                                               | 施工方法                    | 補修対象防食被覆の種類                      | 適用部位<br>環境区分 |
|----|----------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|
|    | 素地調整程度         | 被 覆 の 仕 様                                                     |                         |                                  |              |
| J  | St 3<br>パワーツール | エポキシ樹脂塗料下塗(40 $\mu$ m) + 超厚膜型エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m) $\times$ 3 | はけ塗り                    | エポキシ樹脂塗料系                        | 飛沫部          |
| K  | St 3<br>パワーツール | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料(5mm) + 厚膜型エポキシ樹脂塗料(150 $\mu$ m)                 | へら塗り、ローラー仕上げ<br>はけ(上塗り) | エポキシ樹脂塗料系<br>(被塗面の凹凸が著しい場合)      | 飛沫部          |
| L  | St 3<br>パワーツール | ペトロラタムペースト + ペトロラタムテープ(2mm) + 熱収縮ポリエチレンカバー(5mm)               | 手巻き、ガスバーナ加熱             | ポリエチレン被覆系<br>ポリウレタンゴム被覆系         | 飛沫部<br>干満部   |
| M  | St 3<br>パワーツール | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料(5mm) (ガラスクロス併用の場合を含む)                           | へら塗り、ローラー仕上げ<br>(こて塗り)  | エポキシ樹脂塗料系<br>(被塗面の凹凸が著しい場合)      | 飛沫部<br>干満部   |
| N  | St 3<br>パワーツール | ペトロラタムペースト + ペトロラタムテープ(2mm) + FRPカバー(2.5mm)                   | 手巻き                     | 各種樹脂塗料系<br>ポリエチレン被覆系、ポリウレタンゴム被覆系 | 飛沫部<br>干満部   |

### (1) 超厚膜型エポキシ樹脂塗料

阿字ヶ浦での補修試験の結果、500  $\mu$ m 程度の膜厚で22年にわたり比較的良好な防食性を示し、他の試験でも安定した成績を示していたので、防食効果を高めるため厚膜型を超厚膜型にかえて塗膜厚を増した形で採用することとした。はけ塗りで厚膜に仕上げるため、厚塗り性に優れた作業性の良い塗料の選定と熟練塗装工による施工が不可欠である。

旧塗膜がエポキシ樹脂系で、被塗面の凹凸が比較的小さく、着色が必要な場合に適用する。

### (2) 水中硬化型エポキシ樹脂塗料 + 厚膜型エポキシ樹脂塗料

東京湾千葉川崎製鐵沖で行った防食鋼管杭の被覆損傷部の補修試験で、無機ジンクリッチペイント(75  $\mu$ m) + ガラスクロス補強厚膜型エポキシ樹脂塗料(300  $\mu$ m)  $\times$  3の塗膜損傷部の補修に用い優れた防食効果を示した。

水中硬化型エポキシ樹脂塗料は、へら塗り→ローラー仕上げ、厚膜型エポキシ樹脂塗料ははけ塗りにより塗装する。ここで、水中硬化型エポキシ樹脂塗料の品質の選定はとりわけ重要で、実績のある塗料の中から防食性と作業性を考慮して選定する必要がある。いずれの塗料も作業性が悪いので、経験の豊かで技量の優れた塗装工を選ぶ必要がある。

旧塗膜がエポキシ樹脂系で、腐食により凹凸が比較的大きく、着色が必要な場合に適用する。

### (3) 石油ワックス系材 + ポリエチレンカバー

東京湾千葉川崎製鐵沖で行った防食鋼管杭の被覆損傷部の補修試験で、ポリエチレン押し出しライニング(4mm)の被覆損傷部の補修に用い、優れた防食効果を示したので選定した。

新設用防食被覆のポリエチレン被覆やポリウレタンゴム被覆の現場における同種材料による部分的な補修技術は、現在のところ未開発で、適用できる仕様としては本仕様が唯一のものである。

ペトロラタムペースト塗布→ペトロラタムテープ(2mm)手巻→割り型熱収縮ポリエチレンスリーブ装着→プロパンガスバーナ加熱により施工する。この際、加熱し過ぎないように注意が必要である。

#### (4) 水中硬化型エポキシ樹脂塗料（ガラスクロス併用）

阿字ヶ浦での補修試験の結果、飛沫部では勿論のこと干満部においても、波浪による流出がなく健全な被覆が形成できれば、長期の防食効果を発揮することを確認できたので選定した。

鋼材の腐食により被塗面の凹凸が著しい場合に適用する。

ただし、干満部への適用は、内湾などで海上が静穏であれば施工できるが、波浪の激しい外海などでは、未硬化塗料の流出などにより健全な被覆形成が困難な場合があることを考慮し、ガラスクロス併用による塗料の流出防止対策を含める。

この種の被覆は、明石海峡の岩屋田之代沖での試験でも、干満部補修に適用可能との感触が得られていたものであるが、明らかに波浪がある状況での干満部の施工では、クロス材や金網などを併用しても、健全な被覆の形成は困難なのでできる限り海上が静穏な干満時を選んで施工することが大切である。

#### (5) 石油ワックス系材＋FRPカバー

阿字ヶ浦での補修試験の結果、大気部や飛沫部では勿論のこと、干満部においても優れた防食効果を示した。

この防食被覆は、実績も多く信頼性も高いが激しい波浪や漂砂の影響を受ける阿字ヶ浦での試験結果から、FRPカバーの耐久性に若干の問題が認められたので、保護カバーを更に耐久性のある材質を例えば、チタンや耐海水性ステンレス鋼に換えるなどにより、更に長期の耐久性が期待できると思われる。

各種樹脂塗料系や有機被覆系など、適用できる範囲は広く部分的な補修にも適用できる。

### 2. 3. 2 大面積の補修用推奨防食仕様

広範囲な劣化に適用する場合の部の推奨防食仕様を表5.2-2 に示す。

表5.2-2 大面積補修用推奨防食仕様例

| 記号 | 防 食 仕 様            |                                                       | 施工方法              | 補修対象防食被覆の種類                 | 適用部位<br>環境区分 |
|----|--------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------|
|    | 素地調整程度             | 被 覆 の 仕 様                                             |                   |                             |              |
| R  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | エポキシ樹脂塗料下塗(40 $\mu$ m)＋超厚膜型エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m)×3    | はけ(下塗り)<br>エアレス   | 無被覆<br>エポキシ樹脂塗装系            | 飛沫部          |
| S  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | 有機ジンクリッチプライマー(20 $\mu$ m)＋超厚膜型エポキシ樹脂塗料(300 $\mu$ m)×3 | はけ(プライマー)<br>エアレス | 無被覆                         | 飛沫部          |
| T  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料(1000 $\mu$ m)                     | 圧送式エアスプレー         | 無被覆<br>ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料系 | 飛沫部          |
| U  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | ペトロラタムペースト＋ペトロラタムテープ(2mm)＋保護カバー(*)                    | 手巻きなど             | 無被覆<br>各種樹脂塗料系              | 飛沫部<br>干満部   |
| V  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | 水中硬化型エポキシ樹脂塗料＋金網                                      | こて塗り              | 無被覆                         | 飛沫部<br>干満部   |
| W  | Sa2 ブラスト<br>(ウエット) | セメントコンクリート(鉄筋補強)20cm(**)                              | 型枠取付、配筋、打設        | 無被覆                         | 飛沫部<br>干満部   |

(注) (\*)：ボルトじめFRPカバー(2.5～3mm)、機械じめチタン製カバー(0.4mm)などを選択使用する。

(\*\*)：型枠使用(鋼製またはFRP製、保護カバーとして使用可)，樹脂塗装鉄筋使用，無収縮セメント使用，材料分離防止のため混和剤や混和材を使用。

### (1) エポキシ樹脂塗料+超厚膜型エポキシ樹脂塗料

阿字ヶ浦での補修試験の結果、500 $\mu$ m程度の膜厚で22年間にわたり比較的良好な防食性を示し、他の試験でも安定した成績を示していたので、防食効果を高めるため厚膜型エポキシ樹脂塗料を超厚膜型にかえて塗膜厚を増した形で採用した。

下塗り塗料ははけ塗り、超厚膜型エポキシ樹脂塗料はエアレスにより塗装する。したがって、超厚膜型エポキシ樹脂塗料は、実績のある塗料の中からエアレス塗装で厚塗りできる品質の塗料を選ぶ必要がある。

無塗装面や旧塗膜がエポキシ樹脂塗料系で、被塗面の腐食による凹凸が比較的小さくかつ塗装面積が大きく着色が必要な場合に適用する。

### (2) 有機ジンクリッチペイント+超厚膜型エポキシ樹脂塗料

阿字ヶ浦での補修試験で比較的良好な防食性を示し、素地調整のグレードが高い場合は、Rの仕様により良好な防食性が期待でき作業性が良く実績も多い点を考慮して選定した。ただし、活膜の上に塗布すると密着性に問題が生じることがあるので、被塗面が無被覆の場合にのみ適用する。

### (3) ガラスフレーク塗料

阿字ヶ浦での補修試験の結果、500 $\mu$ m未満の膜厚で22年間にわたり比較的良好な防食性を示し、他の試験でも比較的小さい膜厚で優れた防食性を示し、防食鋼管杭の曝露試験においてもこの種被覆の試験片での成績が極めて良好であった。また、土木研究所で行った多くの試験でも優れた防食効果を確認している。

阿字ヶ浦での補修試験は、仕様の膜厚は1000 $\mu$ mであったが、最終調査箇所の実測膜厚は500 $\mu$ m未満であり、かつ波が砕け飛沫がかかる条件で施工した点を考慮する必要がある。したがって、1000 $\mu$ mの膜厚となるよう海上が静穏な時に施工すれば、さらに長期の耐久性が期待できる。

ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料の塗装は、圧送式エアスプレーにより、ウエット・オン・ウエットの1回塗りで乾燥膜厚1000 $\mu$ mの塗装を行うことができるが、その場合は、均一な塗装ができるよう、ウエット塗膜厚の管理に注意が必要である。また、主剤に対する硬化剤の混合比が非常に小さく、ポットライフも短いので、塗料の混合、気温および塗料の調合量に留意し塗料の粘度変化に注意しながら塗装する必要がある、水分が付着している被塗面に塗装すると硬化不良など健全な塗膜の形成が困難になることがあるなど、現場での作業性にも問題があるので塗装時には、塗料の性状を熟知している塗料メーカーの技術者の指導を得ることが望ましい。

### (4) 石油系ワックス材+保護カバー

阿字ヶ浦における補修試験の結果および多くの実績から選定した。しかし、さらに耐久性を高めるためには、締め付けボルトを含めたFRPカバーの耐久性改善の必要性が認められた。本仕様では、最近の技術開発の進展を加味して、カバーの材質をチタン材(0.4mm)に換えることとした。カバーは、たとえ孔食により孔があいても、ごく小さければ機能的に問題がないと考えられるので、チタンより安価で板厚を増すことのできるステンレス鋼、例えばSUS316Lクラス程度の採用の可能性もあるように思われる。

補修規模の大小にかかわらず適用できるばかりでなく、新設の場合にも適用できる。

### (5) 水中硬化型エポキシ樹脂塗料+金網

阿字ヶ浦での補修試験には、この種のより効果的な波浪による塗料の流出防止対策をとらなかったが、その後、技術開発の進展により金網併用の効果が確認され実績も増加しているので採用した。

### (6) セメントコンクリート

阿字ヶ浦での補修試験では、鉄筋で補強しなかったため短期間で被覆が崩落したが、東京湾千葉川崎製鉄沖で実施した防食鋼管杭の曝露試験により良好な評価を得たこと、多くの優れた実績を有することなどを考慮し改善策を講じることを前提に選定した。

型枠を用い、鉄筋を配置しコンクリートを注入打設する土木的な方法で施工する。飛沫部、干満部の両方に適用できる。鉄筋に耐食性に優れた樹脂塗装鉄筋の使用、硬化収縮の少ないセメントの選定、材料分離を防止するための混和材や混和剤の配合、コンクリート充填の確認など、施工上の注意が必要である。

補強材としてスチールファイバーを混入したセメントモルタルを用い、型枠施工や吹き付け施工する方

法も東京湾千葉川崎製鐵沖の試験で行い良好な防食効果を確認しているが、いずれも施工性が良くないのが欠点である。ここでは、施工性を考慮し被覆の厚みを20cmとしたが、使用材料についての上記注意事項の遵守を前提とすれば15cm程度の厚みでも良いと考えられる。

本防食被覆を適用する場合は、鋼管表面の劣化被覆や錆など、コンクリートの付着性を阻害する付着物を十分除去してから施工する。

## 2. 4 補修用推奨防食仕様の適用性

補修用防食仕様の選定に際しては、構造物の適用部位のほか耐用年数、イニシャルコスト、使用実績などの適用性についても把握しておく必要がある。試験結果や文献調査などに基づいて、海洋鋼構造物の補修用推奨防食仕様の適用性についてとりまとめた結果を表5.2-3に示す。

表5.2-3 補修用推奨防食仕様の適用性

| 防 食 被 覆 の 仕 様                                                          | 耐用年数 | イニシャル<br>コ ス ト | 適用実績 | 適用部位           |
|------------------------------------------------------------------------|------|----------------|------|----------------|
| エポキシ樹脂塗料下塗(40 $\mu$ m)+超厚膜型エポキシ樹脂塗料<br>(300 $\mu$ m) $\times$ 3        | ○    | ○              | ○    | 飛 沫 部          |
| 有機ジンクリッチプライマー(20 $\mu$ m)+超厚膜型エポキシ樹脂<br>塗料<br>(300 $\mu$ m) $\times$ 3 | ○    | ○              | ○    | 飛 沫 部          |
| ガラスフレーク入りポリエステル樹脂塗料 (1000 $\mu$ m)                                     | ○    | ○              | △    | 飛 沫 部          |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料(5mm)+厚膜型エポキシ樹脂塗<br>料<br>(150 $\mu$ m)                    | ◎    | △              | △    | 飛 沫 部          |
| ペトロラタムペースト+ペトロラタムテープ(2mm)+保護カ<br>バー(*)                                 | ◎    | △              | ◎    | 飛 沫 部<br>干 満 部 |
| 水中硬化型エポキシ樹脂塗料(5mm)+金網                                                  | ◎    | △              | ◎    | 飛 沫 部<br>干 満 部 |
| セメントコンクリート (鉄筋補強)20cm(**)                                              | ◎    | △              | ◎    | 飛 沫 部<br>干 満 部 |

(注)(\*) : ボルトじめFRPカバー(2.5~3mm),機械じめチタン製カバー(0.4mm)などを使用

(\*\*) : 型枠使用(鋼製またはFRP製保護カバーとして併用可), 樹脂塗装鉄筋, 無収縮セメント,  
材料分離防止用混和剤(材)を使用

耐 用 年 数 : ◎ 20年以上, ○ 15年程度。

イニシャルコスト : ○ 比較的安価, △ 高価。

適 用 実 績 : ◎ 多い, ○ 中位, △ 少ない。

### 3. 漂砂による鋼管杭の摩耗について

#### 3. 1 海岸工学的解析

これまで腐食防食技術の分野で、サンドエロージョンとして海底砂の流動による鋼管杭の摩耗腐食が論議されてきたが、今回は、漂砂現象のデータと鋼管杭の腐食速度データの双方が得られたので、海岸工学的解析で漂砂現象と摩耗腐食のデータを結びつけることができ数量的資料が得られた。

今回は、防食試験のひとつの試みとして無防食の裸杭の外側にガードリングを装着してみたが、もし、ガードリングが無かったら相当な減厚をしたであろうと想定される。そのためには、流砂の連続衝撃に耐え得る材料工法等で防護する必要がある。

激しい漂砂による鋼管杭の腐食速度は、飛沫部の腐食に匹敵するほどの、腐食速度を示した。まして、漂砂には、ある程度の潮流を伴うので、その流速条件を加味しなければならない場合がありそうである。

さきに、鳴門海峡の高潮流条件下で、防食電流の必要量を試験し、 $2 \sim 5 \text{ m/s}$ の流速では、静水時の1.5倍以上の防食電流を必要とする結果を得たことに鑑み、鋼管杭表面を砂が摩擦し、それに流速が重なることで、鋼管杭の摩耗腐食がより進み、腐食速度がより大きくなることは十分考えられる。

#### 3. 2 漂砂等摩耗対策について

漂砂が活発な海域で鋼管杭表面の摩耗減厚が考えられる場合は、その対策を講じるのがよい。

漂砂の摩擦防止、流水対策の両面を考慮した防食方法としなければならない。

- ①腐食しろ：耐用期間が短い構造物にあっては、年数に見合った腐食速度をカバーできる腐食しろを肉厚に付加する。
- ②鞘管的な犠牲鋼板：鋼管杭の外周をガードする鞘管としての鋼管を装着する。たとえ部分的な孔食や集中腐食が生じて、消失面積が少なく健全部が大半の場合は、十分防護効果が期待できる。
- ③耐摩耗性厚膜有機材による被覆：漂砂の摩耗防護と流水対策をを主目的として、ポリエチレンライニング等の被覆を施す。あるいは、FRP材等のカバーを使用する。
- ④電気防食法：電気防食法を用いると、陽極から発生する防食電流は、海水に接している鋼構造物の海中中部や海底土中部の表面全域に流入するので、適切な設計が行われれば電気防食の効果は、漂砂により磨耗腐食を生じる部位も含めて常時没水部全体に及ぶ。

なお、漂砂による鋼管杭の磨耗特性については、第4編に記述したように、阿字ヶ浦海岸の底質の平均粒径 $1 \text{ mm}$ 以下の砂と同等の砂を用いて行った山下ほかの研究結果では、砂粒の衝突エネルギーは非常に小さく、浮遊砂の衝突による磨耗はあまり発生しないと推定されている。

阿字ヶ浦海岸における浮遊砂濃度の観測値 $1 \sim 9 \text{ kg/m}^3$ より大きい $25 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ の浮遊砂濃度の食塩水を用い、 $1 \sim 6 \text{ m/sec}$ の流速で、斎藤、重野、熊谷が行った軟鋼のエロージョン試験の結果では、砂の粒径が $0.15 \sim 0.42 \text{ mm}$ とやや小さい条件ではあるが、鋼の腐食に及ぼす砂の影響は、鋼表面の付着錆を除去することによる電気化学的な腐食促進作用のみで、砂粒子の衝突による機械的作用による磨耗は認められず、したがって電気防食により完全防食ができることが明らかにされている。

ただし、この試験で得られた砂を含む流速 $6 \text{ m/sec}$ における所要防食電流密度は、通常の海水条件や流速のある条件と比較すると $1.8 \text{ A/m}^2$ と極めて大きく、電気防食のみの適用は経済的ではない。このため、厚膜型塗装や耐摩耗性に優れた有機ライニング材との併用等が効果的と考えられる。「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」では、潮流が $5 \text{ m/sec}$ の場合の初期防食電流密度を $270 \text{ mA/m}^2$ としている。また、設定電位 $-800 \text{ mV (SCE)}$ における定電位試験の結果では、 $6 \text{ m/sec}$ の流速のときの防食電流密度は $300 \text{ mA/m}^2$ 弱と見積もられるが、この値と比較しても6倍の防食電流密度を必要としており、サンドエロージョンによる腐食促進作用が如何に大きいかがわかる。

## あとがき

建設省土木研究所では、海域の土木鋼構造物における防食の重要性に鑑み、今日、官民の共同研究を実施しているほか、新設、補修を含め大気中から飛沫部、干満部、海水中、海底土中にわたる全般的な防食技術の研究開発を行っている。

飛沫部を対象とする防食技術については、昭和51年(1976)2月からの阿字ヶ浦での曝露試験開始に先立ち、同じ共同研究で昭和50年(1975)2月から東京湾川崎製鐵沖(千葉市)で防食鋼管杭の曝露試験を開始した。

また、本州四国連絡橋関連では、昭和45年(1970)7月に本州四国連絡橋公団と共同研究で淡路島岩屋田之代沖の海上観測台脚柱鋼管を対象に大気中から飛沫部、干満部の塗覆装試験施工を実施した。

東京湾横断道路橋関連では、昭和47年(1972)4月に東京湾の浮島沖と木更津沖の第2海堡北方付近に設置した鋼製台船型曝露台や浮島沖の人工島近くに打ち込んだ鋼管杭等を利用して、補修技術を含む防食技術全般にわたる試験を実施した。

さらに、昭和59年(1984)3月駿河湾の静岡県大井川町沖に、科学技術振興調整費により設置した海洋技術総合施設(愛称マリーンステーションするが)では、海洋構造物の耐久性向上技術に関する官民の共同研究として、鋼構造、鉄筋コンクリート構造の全般的な防食技術(防錆塗装材、防食塗覆装材、電気防食法、コンクリート材)の研究を現在でも継続実施しており、これら各種の試験により多くの成果を得ている。

今回、この報告書のまとめにあたっては、阿字ヶ浦での試験で22年間という曝露試験としては最も長期のデータが得られたので、この試験の成果を基にこれまで過去に実施してきた各種試験から得られた成果や実績を勘案し、最新の防食技術で新設時と補修時の防食方法について見解をまとめた。

また、漂砂観測から得られたデータと鋼管杭の22年間の腐食状況データとを結びつけた「漂砂による鋼管杭磨耗腐食」の一見解が得られた。

さらに、千葉沖阿字ヶ浦曝露試験の進展拡大実験として、駿河湾での実大鋼構造物(ジャケット構造物)を使った曝露試験が行われている。これは現在、土木研究所・(社)鋼材倶楽部・(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会・(財)土木研究センターの共同研究として進められている。

また、鋼管杭協会では、日本内地での曝露試験のほか進展型実験として、ミンダナオ・シンガポールでの熱帯地域曝露試験を実施している。

このような共同研究の試験途中に得られた成果も速報的に地建公団等の関係機関等多方面に活用され、実用の参考に供されている。いずれ、これらの知見を総合して指針等の作成を考えている。

## 謝 辞

最後に、本報告書のとりまとめにあたりご尽力いただきました阿字ヶ浦防食鋼管杭の調査委員会委員名簿並びに、本研究の計画・実施・調査に携わられた関係者の名を記し、深甚なる謝意を表する次第です。

### 阿字ヶ浦防食鋼管杭の調査委員会（敬称略）

|        |       |                                          |
|--------|-------|------------------------------------------|
| 委員長    | 蒔田 實  | 財団法人 土木研究センター参与                          |
| 委員     | 田中柳之助 | 財団法人 土木研究センター前顧問                         |
| 同      | 片脇 清  | 社団法人 日本鋼橋塗装専門会顧問                         |
| 同      | 明嵐政司  | 建設省土木研究所材料施工部化学研究室長                      |
| 同      | 鳥居謙一  | 建設省土木研究所河川部海岸研究室長                        |
| 同      | 西澤信二  | 鋼管杭協会防食委員会技術委員長 川崎製鐵(株)建材センター建材技術部課長     |
| 同      | 吉田 節  | 鋼管杭協会防食委員会技術委員 (株)クボタ鋼管技術部土建技術課課長        |
| 同      | 佐々木寛二 | 鋼管杭協会防食委員会技術委員 住友金属工業(株)建設技術部東京土木建材技術室課長 |
| 同      | 土居一幸  | 新日本製鐵(株)鉄構海洋事業部建設・技術部部長代理                |
| 同      | 戸村寿一  | (株)ナカボーテック顧問                             |
| 委員・幹事長 | 守屋 進  | 建設省土木研究所材料施工部化学研究室主任研究員                  |
| 委員・幹事  | 山本幸次  | 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員                      |
| 同      | 森 芳徳  | 財団法人 土木研究センター技術研究所専門調査役                  |
| 同      | 村瀬正次  | 鋼管杭協会防食委員会 川崎製鐵(株)技術研究所表面処理研究部主任研究員      |
| 同      | 原田佳幸  | 鋼管杭協会防食委員会 新日本製鐵(株)鉄鋼研究所表面処理研究部主任研究員     |
| 同      | 宮田志郎  | 鋼管杭協会防食委員会 NKK総合材料技術研究所利用・評価技術研究部主任研究員   |
| 同      | 中家俊和  | 関西ペイント(株)船舶・鉄構塗料本部第2技術部課長                |
| 同      | 川口永一  | 鋼管杭協会事務局次長                               |
| 事務局    | 坂本浩行  | 財団法人 土木研究センター技術研究所調査試験第二部長               |

### 関係者名簿（所属は本研究に最初に関与された当時、敬称略、順不同）

#### 防食ぐい開発委員会

|     |       |             |       |            |
|-----|-------|-------------|-------|------------|
| 委員長 | 松崎彬麿  | 本州四国連絡橋公団   |       |            |
|     | 玉野治光  | 首都高速道路公団    |       |            |
| 委員  | 青木敬雄  | 財団法人電力中央研究所 | 藤田忠夫  | 建設省道路局国道二課 |
|     | 川崎浩司  | 神奈川大学工学部    | 塩井幸武  | 本州四国連絡橋公団  |
|     | 善 一章  | 運輸省港湾技術研究所  | 橋本鋼太郎 | 建設省道路局国道二課 |
|     | 吉田 巖  | 本州四国連絡橋公団   | 横井聡之  | 運輸省港湾技術研究所 |
|     | 高島 洸  | 建設省中国地方建設局  | 山下理雄  | 本州四国連絡橋公団  |
|     | 池見恒夫  | (株)日本製鋼所    | 山田 功  | 建設省道路局国道二課 |
|     | 竹村公太郎 | (株)日本製鋼所    | 加島 聡  | 本州四国連絡橋公団  |
|     | 門井守夫  | 日本大学理工学部    |       |            |
|     | 結城康雄  | 建設省道路局企画課   |       |            |
|     | 堀 泰晴  | 建設省道路局国道二課  |       |            |
|     | 金光 宏  | 本州四国連絡橋公団   |       |            |
|     | 会田 正  | 建設省道路局企画課   |       |            |
|     | 清水孝一  | 建設省道路局企画課   |       |            |
|     | 桐本昌典  | 建設省道路局国道二課  |       |            |

**建設省土木研究所関係者**

|      |            |
|------|------------|
| 豊島 修 | 赤羽支所       |
| 柳田 力 | 地質化学部      |
| 桑原啓三 | 地質化学部      |
| 蒔田 實 | 地質化学部化学研究室 |
| 森 芳徳 | 地質化学部化学研究室 |
| 西島高秀 | 地質化学部化学研究室 |
| 片脇 清 | 地質化学部化学研究室 |
| 守屋 進 | 地質化学部化学研究室 |
| 村山 進 | 地質化学部化学研究室 |
| 明嵐政司 | 材料施工部化学研究室 |
| 鳥居謙一 | 河川部海岸研究室   |
| 山本幸次 | 河川部海岸研究室   |

**鋼管杭協会関係者**

|       |      |
|-------|------|
| 田中柳之助 | 専務理事 |
| 浅間達雄  | 専務理事 |
| 嶋津晃臣  | 専務理事 |
| 大野芳保  |      |
| 井桁幹雄  |      |
| 西山 誠  |      |
| 佐藤信三郎 |      |
| 真々田 守 |      |
| 中西成幸  |      |
| 西山喜雄  |      |
| 川口永一  |      |

**川崎製鐵株式会社関係者**

|      |            |
|------|------------|
| 石渡正夫 | 建設開発部土木開発室 |
| 久野忠一 | 表面処理研究室    |
| 中川宏夫 | 建設開発部土木開発室 |
| 村木幸春 |            |
| 小関楯司 | 土木技術部      |
| 江面行正 | 建材技術部      |
| 高橋 功 | 鋼構造研究所     |
| 栗栖孝雄 |            |
| 西澤信二 | 建材技術部      |
| 村瀬正次 | 技術研究所      |

**久保田鉄工株式会社(現株クボタ)関係者**

|       |             |
|-------|-------------|
| 長尾正三  | 鉄管研究部       |
| 錦 勝郎  |             |
| 新熊莊一  | 鋼管研究部       |
| 浜本真之祐 | 鋼管営業部       |
| 大槻 貢  | 鋼管研究部       |
| 黒沢太雅  | 鋼管営業部       |
| 土谷正幸  | 鋼管エンジニアリング部 |
| 鈴木規彦  | 鋼管研究部       |
| 吉田 節  | 鋼管技術部       |

**新日本製鐵株式会社関係者**

|       |            |
|-------|------------|
| 山田光二  | 技術開発部      |
| 金子堅次郎 | 製品技術研究所    |
| 望月博正  | 土木技術サービス   |
| 岡本忠亮  | 技術開発部      |
| 前田成亮  | 製品技術研究所    |
| 鈴木嘉秋  | 製品技術研究所    |
| 浅井 彰  | 技術企画管理部    |
| 土居一幸  | 表面処理研究センター |
| 吉田耕太郎 | 第2技術研究所    |
| 大長 智  | 建材開発技術部    |
| 三好武久  | 建材開発技術部    |
| 佐藤光一  | 建材開発技術部    |
| 原田佳幸  | 鉄鋼研究所      |

**住友金属工業株式会社関係者**

|       |           |
|-------|-----------|
| 佐武二郎  | 中央研究所     |
| 浜田耕一郎 | 建設プロジェクト部 |
| 小西良和  | 第2技術開発部   |
| 永田三郎  |           |
| 望月晃海  | 建設プロジェクト部 |
| 田中安正  | 東京技術部     |
| 前田正龍  | 第二製品技術部   |
| 加藤 敏  | 建材技術部     |
| 北村昌章  | 製品開発室     |
| 瀬渡哲朗  | 建材技術部     |
| 塩谷千歳  | 建材技術部     |
| 新井哲三  | 総合技術研究所   |
| 阿部 孝  | 建設技術部     |
| 佐々木寛二 | 建設技術部     |

日本鋼管株式会社関係者

|      |              |
|------|--------------|
| 木寺謙爾 | 鉄鋼技術部        |
| 玉田明宏 | 技術研究所表面処理研究室 |
| 清水義明 | 技術研究所        |
| 福屋智亘 | 建材条鋼営業部      |
| 田中繁夫 | 建設鋼材部        |
| 岩倉 肇 | 建設鋼材部        |
| 森岡芳之 | 総合技術研究所      |
| 鈴木 操 | 建設鋼材部        |
| 宮田志郎 | 総合技術研究所      |

株式会社日本製鋼所関係者

|      |       |
|------|-------|
| 大西敬三 | 研究部   |
| 津田正夫 | 生産企画室 |
| 井上欣一 | 開発本部  |
| 大橋 明 | 公共部   |
| 塚田尚文 | 室蘭製鉄所 |

(財) 国土開発技術研究センター関係者

高瀬三郎  
立石俊一  
城江利彦  
松野頼三  
高島 修

(財) 土木研究センター関係者

|      |        |
|------|--------|
| 坂本浩行 | 技術研究所  |
| 杉田好春 | 元技術研究所 |