

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

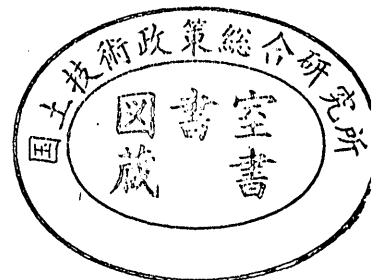
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 15

NO. 3

SEPT. 1976

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第15巻 第3号 (Vol. 15, No. 3), 1976年9月 (Sept. 1976)

目 次 (CONTENTS)

1. 波の連なりの統計的性質について…………… 合田良実………… 3
(On the Statistics of Wave Groups……………Yoshimi GODA)
2. ネガティブフリクションに関する実験と考察(第2報)
——アスファルトコーティング杭の現場実験——
…………… 高橋邦夫・沢口正俊………… 21
(Experimental Study on Negative Skin Friction on Piles (2nd Report)
——Field Experiment of Asphalt Coated Piles——
……………Masatoshi SAWAGUCHI, Kunio TAKAHASHI)
3. 空港舗装用アスファルトコンクリートのレオロジー的考察
…………… 福手 勤・佐藤勝久・渋谷英夫………… 53
(A Rheological Study on Asphalt Concretes for Airport Pavements
……………Tsutomu FUKUTE, Katsuhisa SATO, Hideo SHIBUYA)
4. 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリートばりの疲労強度(第1報)
…………… 堀井修身・上田 茂・柳沢雄博………… 69
(Study on Fatigue of Reinforced Concrete Beams (1st Report)
……………Osami HORII, Shigeru UEDA, Katsuhiko YANAGISAWA)
5. 海底パイプラインに作用する衝撃荷重の実験的研究
…………… 中山茂雄・清宮 理・藤澤孝夫………… 99
(Laboratory Impact Load of Anchors on Submarine Pipelines
……………Shigeo NAKAYAMA, Osamu KIYOMIYA, Takao FUJISAWA)
6. 海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策に関する研究
…………… 善 一章…………147
(Studies on the Situation of Corrosion of Steel Structures in Marine Environments
and Measures against Concentrated Corrosion……………Kazuaki ZEN)

6. 海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と 集中腐食対策に関する研究

善 一 章*

要 旨

提案した調査法で得られた鋼構造物の腐食の実態に基づいて鋼構造物の腐食傾向、腐食傾向の発生機構および発生条件、腐食傾向に基づく集中腐食対策を検討し、次の結果を得た。

(1) 集中腐食の発生状況によって鋼構造物の腐食傾向を分類した。調査結果から鋼矢板構造物の腐食傾向は(a)~(e)の5通りに分類できた。鋼矢板の腐食傾向が(a), (d), (e)のとき10.5mm厚の鋼矢板に10数年未満で穴があき、穴から裏込め土砂が流出して上部工が陥没した例がある。

鋼管杭構造物の腐食傾向は(a), (b), (c)の3通りに分類できた。鋼管杭の腐食傾向が(a)のとき9mm厚の鋼管杭が10年未満で使用不能となった例がある。

閘・水門施設ではM. L. W. L. 直下付近の部材の突出部に腐食が集中する傾向があり、M. L. W. L. 直下の溝形鋼の幅が急減したためスクリーンが数年未満で破断した例がある。

(2) 83例の鋼矢板構造物の調査データについて鋼矢板の腐食傾向と環境条件との関係を検討した結果、腐食傾向に影響する要因としては潮位差の有無、水深の大小、淡水の存在、上部コンクリートの深度、鋼材の形状(突出部の大小)、裏込め材の種類、残留水位の変動などが考えられる。集中腐食の発生因をマクロ腐食の発生傾向に基づいて考察すると集中腐食はマクロ腐食が発生しやすい条件のときに発生すると説明でき、また鋼矢板構造物の腐食傾向に影響する要因はマクロ腐食の発生傾向と矛盾しないことがわかった。

(3) 調査例の多い鋼矢板構造物の調査データについて要因分析を行ない、分析結果を用いて腐食傾向の推定を試みた。この結果鋼矢板の腐食傾向(a), (b), (c)の推定が可能となった。

(4) 集中腐食対策の一つとして鋼構造物の集中腐食の発生条件を集中腐食が発生しにくい条件とする方法を示した。また推定した鋼構造物の腐食傾向に基づいた集中腐食個所に集中腐食量に見合う鋼材片を取付ける集中腐食対策も示した。

* 構造部防食主任研究官

6. Studies on the Situation of Corrosion of Steel Structures in Marine Environments and Measures against Concentrated Corrosion

Kazuaki ZEN*

Synopsis

Based on the actual state of corrosion of steel structures obtained by the suggested corrosion survey method, corrosion tendencies of steel structures, occurrence mechanisms of corrosion tendencies, conditions for occurrence of corrosion tendencies and measures against concentrated corrosion resulting from the corrosion tendencies were contemplated, and the following results were obtained.

1) It was proposed that corrosion tendencies of steel structures be classified according to the condition of occurrence of concentrated corrosion. As a result of surveys it was possible to divide corrosion tendencies of steel sheet pile structures into five types, (a) to (e). With corrosion tendencies of steel sheet piles of (a), (d) and (e) there have been cases of holes being produced in steel sheet piles of 10.5 mm thickness in less than periods of 10 and several years with backfilling soil flowing out from the holes to cause subsidence of superstructures.

The corrosion tendencies of steel pipe pile structures could be divided into the three types of (a), (b) and (c). With steel pipe piles of (a) there was a case when piles of 9 mm thickness became unusable in less than 10 years. At lock and gate facilities there is a tendency for corrosion to be concentrated at protruding parts of members in the vicinity immediately below M.L.W.L. With lock and gate facilities there was a case in which a screen was ruptured within a period of several years due to rapid reductions in widths of channel steels immediately below M.L.W.L.

2) As a result of examination of the relations between corrosion tendencies of steel sheet piles and environmental conditions with respect to survey data from 83 cases of steel sheet pile structures, it was considered that existence of tidal range, depths of water, presence of fresh water, depths of coping concrete, shapes of steel (sizes of protruding parts), kinds of backfilling material, fluctuations in residual water level, etc. were factors influencing corrosion tendency.

The reason for occurrence of concentrated corrosion was considered on the basis of the tendency for occurrence of macro-corrosion examined in the room and it could be explained that concentrated corrosion is produced under conditions favoring occurrence of macro-corrosion and that factors influencing corrosion tendencies of steel sheet pile structures are not contradictory to the tendency for occurrence of macro-corrosion.

3) Component analysis was done regarding survey data from steel sheet pile structures for which there was a large number of examples, and estimations of corrosion tendencies were attempted using the analysis results. As an outcome it became possible to estimate corrosion tendencies (a), (b) and (c) for steel sheet piles.

4) As one measure against concentrated corrosion, a method was indicated of changing the conditions for occurrence of concentrated corrosion of steel structures into conditions making it difficult for concentrated corrosion to generate. Another measure against concentrated corrosion indicated is to attach pieces of steel corresponding to concentrated corrosion amounts at concentrated corrosion locations based on the estimated corrosion tendencies of steel structures.

* Senior Research Engineer, Structures Division

目 次

要 旨	147
1. 緒 論	151
2. マクロ腐食に関する既往の研究	151
3. 港湾鋼構造物に対する既往の腐食調査	154
3.1 既往の腐食調査法と問題点	154
3.2 既往の腐食調査例	157
4. 提案した腐食調査法	160
4.1 超音波式厚み計（水中用）による非破壊調査	160
4.2 切り取り片または引抜き材について肉厚測定する破壊調査法	162
4.3 鋼構造物の腐食傾向の分類に基づく簡易調査法	163
5. 提案した調査法による腐食調査結果	163
5.1 調査鋼構造物	163
5.2 鋼矢板構造物の腐食の実態	163
5.3 鋼管杭構造物の腐食の実態	177
5.4 閘・水門施設の腐食の実態	179
5.5 鋼構造物にみられる集中腐食の現象	185
6. 鋼構造物の腐食傾向の発生機構についての考察	185
6.1 腐食傾向に影響する要因	185
6.2 集中腐食とマクロ腐食	195
6.3 鋼矢板構造物の腐食傾向の発生条件	198
6.4 鋼管杭構造物の腐食傾向の発生条件	201
6.5 閘・水門施設の腐食傾向の発生条件	201
7. 集中腐食対策に関する提案と実施状況	201
7.1 集中腐食発生程度の子測	202
7.2 集中腐食発生条件からみた対策	204
7.3 集中腐食個所に腐食量に見合った肉厚の鋼材を取付ける方法	204
7.4 港湾鋼構造物設計指針への適用	206
7.5 集中腐食対策の実施状況	207
8. 結 論	207
参考文献	210

1. 緒 論

港湾において1920年代から鋼矢板が使用されているが1960年代には鋼杭工法の発達とともに鋼管杭も多く使用されるようになり、さらに1970年代には海洋開発の進展とともに鋼材の使用目的も多岐にわたるようになってきた。しかし海洋環境では海水が存在するため鋼材の腐食とその対策が重要であることは当然である。これに対して鋼矢板が古くから港湾において使用されておりかっこうの調査対象物であるため鋼矢板構造物について腐食調査が1950年代からいろいろ行なわれてきたが、これらの調査結果は必ずしも鋼矢板構造物の腐食の実態を示していなかった。また腐食試験や腐食対策に関する検討もいろいろ行なわれてきたがこれらはほとんど室内試験や試験材による現地試験であり、また試験期間が比較的短期間である。この他室内試験、現地試験、構造物の腐食調査の結果については共通の立場からの整理はまだ行なわれておらずそれぞれの調査・試験結果が個別に示されている状況である。従って腐食による損傷がひどい現地調査例にぶつかりと海中における鋼材の使用は危険であると感じ、反対に腐食による損傷がほとんどない現地調査を経験すると腐食対策に対する関心が薄くなりがちである。また試験材の腐食と構造物の腐食との区別が明確ではなく構造物の腐食しるは試験片の腐食速度で処理されている現状である。

従って、海洋環境における鋼構造物の設計に当り合理的な腐食対策を選定するには鋼構造物の腐食特性を明らかにすることが先決であるので海中構造物の腐食の実態の把握と腐食機構の解明を試みた。すなわち、まず鋼材片と鋼構造物の腐食の差異を明らかにするため鋼材片の単一環境における腐食をマイクロ腐食、長尺鋼材が異種環境を貫通するとき起こる環境差による腐食をマクロ腐食と区別し、またマクロ腐食に関する既往の研究を調査して長期間経過した鋼構造物とマクロ腐食との関係についての資料のないことを明らかにした。次に海中構造物の腐食調査に関する既往の調査例を検討して、調査法に問題があって既往の調査結果から海中構造物の腐食の実態を把握することがむずかしいことを明らかにした。このため腐食調査法の問題点を検討して超音波式厚み計（水中用）による非破壊調査と引抜きまたは切取り鋼材について測定する破壊調査を含む海中構造物の腐食調査法を提案し、提案した調査法による既設鋼構造物の腐食調査を北海道から九州にかけて鋼矢板構造物、鋼管杭構

造物および閘・水門施設について数多く行なった。調査の結果海中構造物では特定個所に集中腐食が発生するケースのあることがわかった。集中腐食は構造物の特定深度の鋼材の断面係数を急減させるため構造物にとっては極めて危険であり、損傷の著しい場合には集中腐食個所のみの損傷によって、数年または10年未満で構造物が使用不能となる。従って調査結果のうち83例と調査例が最も多い鋼矢板構造物について集中腐食の発生状況によって腐食傾向を分類し、腐食傾向と構造物の環境条件との関連性を検討した。この結果鋼矢板腐食傾向の発生条件を示したが、構造物に発生する集中腐食の現象はマクロ腐食によると考えると腐食傾向の発生条件とマクロ腐食に関する室内実験結果とは矛盾しないこと、鋼矢板構造物についての検討結果は鋼管杭構造物や閘・水門施設にも利用できることなどがわかった。次に鋼矢板構造物の調査例について腐食傾向の推定方法を検討し、またマクロ腐食の立場からの集中腐食対策の提案、提案した集中腐食対策の指針化、海中構造物への適用などを行なった。

以上の現地調査の実施に当っては運輸省港湾局、運輸省港湾建設局、北海道開発局、港湾管理者および運輸省港湾技術研究所の各関係機関の方々に多大の御援助を頂き、特に運輸省港湾技術研究所構造部長林聰博士には長期間にわたる現地調査の遂行に関する御尽力と有益なる御助言を頂いた。関係各位に深く御礼申し上げる。

最後に本論文の作製に当り懇切な御指導と貴重な御示唆を頂いた東京大学教授樋口芳朗博士に謹んで心から御礼申し上げる。

2. マクロ腐食に関する既往の研究

鋼材片を単一の腐食環境（例えば海水中）においたとき鋼材表面には微視的な局部電池が発生して腐食する。このとき局部電池の微小な陽極^注や陰極^注は腐食反応の進行にもなってその位置を変えるので鋼材は全面腐食となる。このような腐食をマイクロ腐食という（マイクロセル腐食ともいわれる）。これに対して長尺鋼材を現地

注) 電気化学反応を説明する符号は紛らわしいので整理してみると次のようになる。

	電池(放電)	電池(充電), 電解	腐食・防食
正 極	陽極カソード	陽極アノード	陰極カソード
負 極	陰極アノード	陰極カソード	陽極アノード

腐食反応では陽極(アノード)で $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$, 陰極(カソード)で $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ となる。

に打込むとき長尺鋼材は異種環境（例えば不飽和砂層と飽和砂層）を貫通するため長尺鋼材面には環境差による腐食が発生する。環境差による腐食は相対的に溶存酸素量の多い環境中（上例では不飽和砂層中）鋼材部分がカソード（陰極）、溶存酸素量の少ない環境中（上例では飽和砂層中）鋼材部分がアノード（陽極）となるマクロセルが発生するもので、このような腐食をマクロ腐食という（マクロセル腐食または長電池作用ともいわれる）。上記のようにいろいろな腐食の呼び方があるが本報ではマイクロ腐食、マクロ腐食と統一した。

マクロ腐食の原理は Evans によって 1923 年示された¹⁾。すなわち Evans は 2 枚の金属試片を塩化カリウム溶液中につけ一方の試片近くの液内だけに空気を吹込んだときこれがカソードとなることを Zn, Cd, Fe, Ni について確かめた。これは空気すなわち酸素が多い方の電極電位が相対的に貴となり酸素が少ない方の電極電位が相対的に卑となるため、この種の電池は通気差電池または酸素濃淡電池といわれる。この結果マクロ腐食は通気差電池（または酸素濃淡電池）によって発生することになるが、このときの腐食電池は長尺鋼材面でカソード、アノード間の距離が局部電池に比べて巨大であるためマクロセル、マクロ腐食電池、巨大電池などと呼ばれる。

Humble は 1949 年に海中鋼杭の深度方向の腐食分布を 図-2.1 のように示している。すなわち常に飛沫をかぶり酸素の供給も十分な飛沫帯は特に腐食が激しい部分であるが、没水部分では干満帯の直下の腐食が大きい。

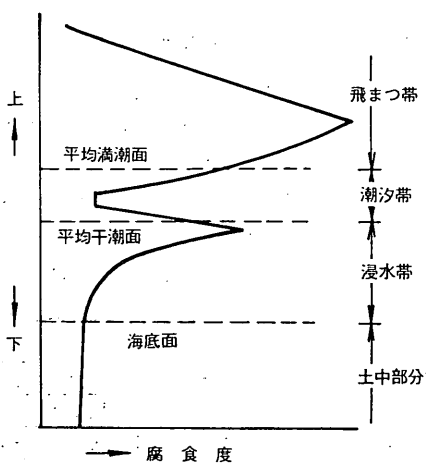


図-2.1 海中の鋼矢板の腐食度 (Kure Beach, 5年浸漬)

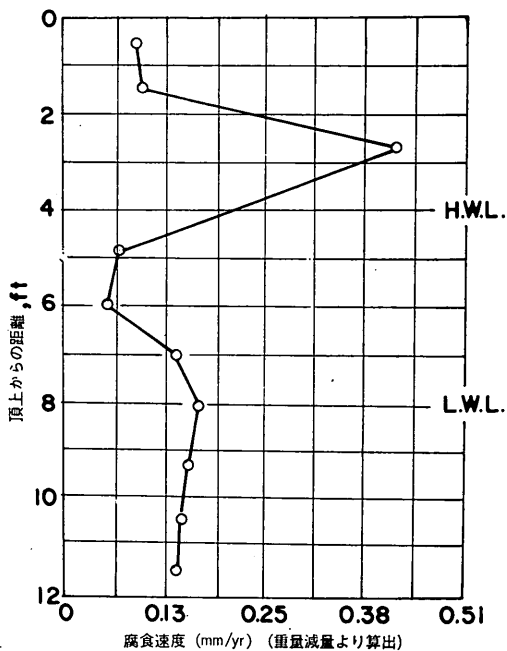


図-2.2 潮位間付近における鋼材腐食状況 (by B. B. Morton)

この理由として干満帯がカソード、M. L. W. L. 直下部がアノードとなる通気差電池の発生を指摘した²⁾。

Morton は長尺鋼材の干満帯の腐食速度は L. W. L. 下の値の約 1/3 となることを示したが L. W. L. 直下の腐食速度は 図-2.2 に示すように海水中と大差ない³⁾。

LaQue は深度別に浸漬した個々の鋼材片と連絡した鋼材片の侵食度を 図-2.3 のように求めている。すなわち連続した鋼材片では長尺杭の場合と同様に干満帯の侵食度は M. L. W. L. の値は約 1/10 と小さい。このように鋼の連続試験片の腐食が干満帯で最小であることを次のように説明している。すなわち海中生物が付着生長しほとんど嫌気性条件下にある干満帯下部に比べて干満帯の部分は高度に通気された海水に接触しているため大きな電位差を生ずる。干満帯の部分は干満帯下部に比べて非常に貴な電位を示す⁴⁾。

Larrabee は 5 年間海中に打込んでいた鋼矢板の腐食傾向を 図-2.4 のように示している⁵⁾。なおこの場合の鋼矢板は試験材として打込まれたもので鋼矢板構造物の場合のように裏込め材は使用されていない。図-2.4 では干満帯の方が海水中より肉厚減量が小さくこのような傾向は鋼矢板材の外 Ni-Cu-P 鋼でも見られる。

Arup & Glantz はデンマーク 20 港の鋼矢板の腐食調

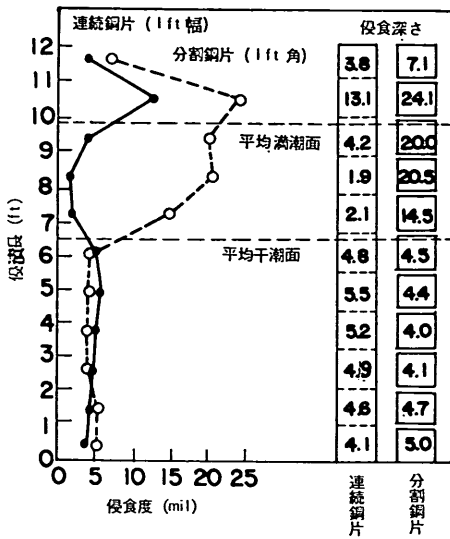


図-2.3 海中浸漬鋼片の侵食度分布 (Kure Beach, 151 day)

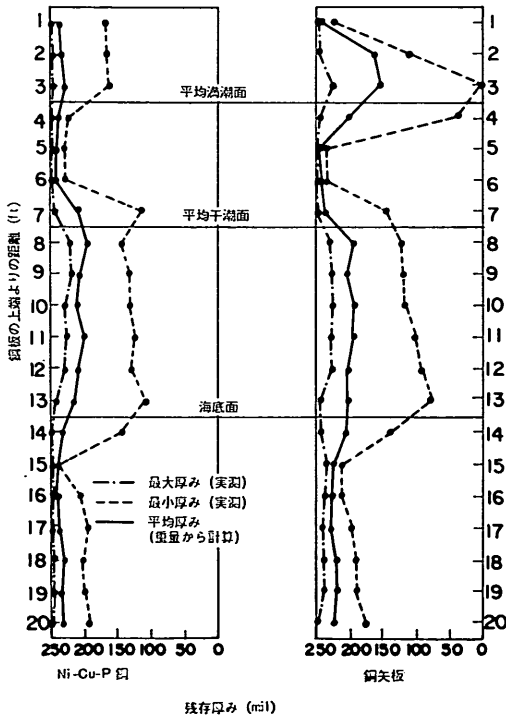


図-2.4 海中浸漬5年後の鋼矢板の厚み (INCO Harbor Island)

査を1961~1962年に行なったところ M. W. L. 下2~3 ft 間に孔食が見られた。この原因として Arup & Glantz

は M. W. L. から3 ft 間の酸素濃度の急減をあげているが、テストピースをコペンハーゲン港に浸漬して鋼材電位を測定した結果では深度による電位差はあまりなかった。これに対して海水汚染によって海面下に酸素発生形の花が附着しさらに深度が下がるとフジツボなどや他の酸素消費形の有機物が附着するのでマクロ環境 (macro-milieu) として検討しないといけないという⁶⁾。

Lattin は海水中に浸漬した鋼材片の腐食速度は1~7 mils/yr=0.025~0.178 mm/yr であるが鋼杭の L. W. L. 直下の腐食速度は10~30 mils/yr=0.254~0.772 mm/yr という。このように鋼材片に比べて鋼杭の腐食速度が大きい理由として空気量の豊富な海水に接する鋼材部分がカソード、空気量の少ない海水に接する鋼材部分がアノードとなる電気化学腐食電池の発生をあげている。この外、脚柱H杭の肉厚が L. W. L. 直下で急減した例を示している⁷⁾。

Akimov は水と飽和砂層の層を鋼材が貫通したとき飽和砂層中鋼材がアノード、水中鋼材がカソードとなる通気差電池が発生するが、これは中性環境中の鋼材面上では溶存酸素濃度差によって電位勾配が生ずるためと説明している。この外一般に通気差電池は静止水中で起こりやすくまた土中でも土質差による通気差電池 (例えば粘土中がアノード、砂層中がカソード) が発生するとしている⁸⁾。

Tomashov 等は模形的実験により10%の水分を含む通気性の砂と不通気性の粘土とを貫通して埋めた鋼管の境界面で激しい腐食が発生することを示した。すなわち開路電位は粘土中で-0.78 V, 砂中で-0.63 V で0.15 V の電位差があり、管の短絡されたとき粘土中鋼材がアノード、砂中鋼材がカソードとなりこのときの流出、入電流を測定した⁹⁾。

Sudrabin は土中に打込まれた基礎鋼管杭の腐食機構の概念図を示している。すなわち土中に打込まれた鋼杭では地下水面上がカソード、下がアノードとなりアノード部よりカソード部へ腐食電流が流入するとしている¹⁰⁾。

Schashl & Marsh は "土壤腐食に対する新見解" (1963) としてこれまでマクロ腐食の定量化はまったく行なわれなかったことを指摘して水の飽和、比抵抗、排水特性と土壤腐食との相互関係に関する室内実験結果を示している¹¹⁾。

既往のマクロ腐食に関する研究のうち、鋼構造物についてのものに Arup & Glantz と Lattin の報文がある

が、前者はただ海洋生物の付着差によるマクロ環境を示唆したのみであり後者は脚柱杭の腐食事例の紹介にとどまっている。また海中試験材によるマクロ腐食の検討には Humble, Morton, LaQue, Larrabee などの報文があるがいずれも試験条件下での試験材についてのデータにとどまっている。

以上のように既往のマクロ腐食に関する研究では本報に示す海中構造物の集中腐食発生状況からの腐食傾向の分類、腐食傾向の発生因、腐食傾向の発生条件からみた集中腐食対策など海中構造物のマクロ腐食に関する検討資料は見当たらない。

3. 港湾鋼構造物に対する既往の腐食調査

3.1 既往の腐食調査法と問題点

鋼構造物の腐食速度^{注1)}は(1)式で表示される。

$$\frac{\text{〔初期肉厚(mm)〕}-\text{〔現有肉厚(mm)〕}}{\text{腐食期間(yr)}} \quad (1)$$

(1)式の現有肉厚を厚み計で測定する調査を非破壊調査、切り取りまたは引抜き鋼材について現有肉厚をマイクロメーターで測定するかまたは重量測定^{注2)}から求める調査を破壊調査という。

日本の海中構造物の腐食調査は1920年頃から使用されている鋼矢板構造物を対象とした非破壊調査がほとんどである。これらの非破壊調査における現有肉厚測定には磁気不飽和形厚み計や T-M 式厚み計などの磁気式厚み計(水中用)が使用された。

磁気的に鋼板の肉厚を測定するには探触子^{注3)}を鋼板に押しあてて鋼板を磁気化するが、このとき作られる磁

注 1) (1)式で算出される腐食速度(mm/yr)は次のようになる。

鋼矢板の腐食速度(mm/yr)は両面(海側+陸側)についての値である。

鋼管杭の腐食速度(mm/yr)は両面(外面+内面)についての値であるが、長期では内面からの腐食速度が小さくほとんど外面からの腐食速度とみなされる。

山形鋼の腐食速度(mm/yr)は両面についての値である。

なおプレート、山形鋼、薄形鋼などでは(1)式の肉厚の代りに幅を用いると幅方向の腐食速度(両面)が求められる。

注 2) 重量測定から現有肉厚を算出するには(2)式による。

$$\text{現有肉厚(mm)} = \frac{W \times 10}{A \times d} \quad (2)$$

ただし W: 測定重量(g)

A: 片面の表面積(cm²)

d: 鋼材の密度(7.86)(g/cm³)

注 3) 被測定鋼材面に押しあてる部分で日本非破壊協会の用語による。

気回路にとっては(i)継鉄(探触子底面の鋼板)と被測定鋼板の間の空隙量、(ii)被測定鋼板の肉厚、(iii)被測定鋼板の材質の3因子が重要である。(ii)の鋼板の肉厚を取出すために(i)、(iii)の因子を処理する方法によって磁気不飽和形厚み計と磁気飽和形厚み計に分かれる。飽和形厚み計は(i)、(ii)の因子に対して不感とするために鋼板を磁気飽和させる方法がとられるが探触子が重くなるのが難点である。これに対して磁気不飽和形厚み計は探触子を飽和形厚み計に比べて小形軽量とし得るが(i)、(iii)両因子の修正を必要とする。

磁気不飽和形厚み計は次の原理で鋼板の肉厚を測定する。すなわち一次、二次側コイルを巻いた鉄芯を鋼板に当てて一次側コイルに交流電圧をかけると二次電圧は一次電圧および鉄芯と鋼板間の空隙量に影響される。従って一次電圧を一定とすれば空隙量と二次電圧との関係から空隙量がわかる。次に一次側コイルに脈流を通すとき二次電圧は鉄芯と鋼板間の空隙量と鋼板肉厚によって変化する。この結果予め交流電圧をかけて空隙量を知れば脈流を通したときの鋼板肉厚と二次電圧との関係から鋼板肉厚が求められる。なお探触子の重量は6~22mm測定用で19kg、3~15mm測定用で13kgであり形状寸法は10cm×(15~20)cm程度である。

いっぽう T-M 式厚み計の詳細は報告されていないが特長として鋼板と探触子間の空隙量が1mm以下では測定値に影響しない、鋼板材質の影響はない、探触子の重量は25kgで15mm以上に使用するにはさらに大形となり5mm以下では小形化できるという。これらの特長からみれば T-M 式厚み計は磁気飽和形厚み計と推定される。

磁気式厚み計による鋼矢板の肉厚測定は次のように行なわれる。まず測定する鋼矢板面の付着物を20cm×30cm(T-M式では25cm×35cm)程度の面積についてハンマーやスクレーラーなどで除去する。次に付着物を除去した鋼矢板面に探触子を押しあて陸上に設置した厚み計本体の目盛を読みこの値を肉厚算出曲線に適用して鋼矢板の肉厚を求める。なお付着物の除去および探触子の押しあて作業は海水面付近と海水面下では潜水夫が行なう。また(1)式の初期肉厚としてはカタログ厚を使用する。肉厚測定箇所は断面方向は凸矢板^{注)}平坦面、深度方向は飛沫帯、干満帯、海水中(上下2深度)である。

破壊調査は鋼構造物の改造または撤去などのとき以外注) 水際線に対して外向鋼矢板(図-6.21参照)

は普通行なわれにくい非破壊調査例に比べて破壊調査例は非常に少ない。破壊調査では鋼矢板構造物から鋼矢板を切取って成形(例えば 10 cm × 10 cm 程度)、脱錆(例えば酸洗い)後にマイクロメーターで成形片 1 枚につき 6 ~ 9 点基盤目状に測定した。鋼矢板の切取り箇所は調査構造物が使用中のためパッチをあてて補修した。(1) 式の初期肉厚としてはカタログ厚または上部コンクリート中の矢板肉厚を使用した。切取り深度は凸矢板平坦面、深度方向は M. S. L., L. W. L. 海水中央部などである。

外国でも非破壊調査と破壊調査が行なわれている。

デンマークでは 1961 ~ 1962 年に 20 港の矢板けい船岸の腐食調査が行なわれた⁶⁾。現有肉厚測定には超音波式厚み計(水中用)が使用された。この厚み計の精度は 0.1 in (2.54 mm) の凹みがあっても ±0.02 in (0.51 mm) の精度で鋼板の肉厚が測定できるといわれるが厚み計の詳細は報告されていない。肉厚の測定箇所は断面方向は鋼矢板の凸面、側面、凹面(図-6.21 参照)を対象としており深度方向は ±0 ~ -1 m 間で 0.25 m ピッチ、-1 m ~ 海泥面までは 1 m ピッチである。なお超音波式厚み計による非破壊調査はデンマークではうまく行ったとのことであり、この外にも南アフリカやノルウェーでも行なわれたともいわれるがこれらについての報告はない。

ニューヨーク港クリントン埠頭の鋼矢板について超音波式厚み計(水中用)による非破壊調査と鋼矢板の切取りによる破壊調査が 1967 年に行なわれた¹²⁾。非破壊調査の肉厚測定箇所は断面方向は凸、凹矢板の平坦面、深度方向は +1, ±0, -1, -3, -5, -7, -10, -15, -20 ft である。この場合も超音波式厚み計の精度は高いというが厚み計の詳細は報告されていない。破壊調査は非破壊調査に先立って行なわれ海面上と海水中から鋼矢板片 62 枚を切取って脱錆後マイクロメーターで肉厚を測定している。

サンタバーバラ(カルフォルニア)近くの H 杭棧橋撤去の際 H 杭を引抜いて野外でフランジ厚をマイクロメーターで測定し、この外切取り鋼材片について室内で重量測定およびマイクロメーターでフランジとウェブの肉厚を測定している¹³⁾。

この外破壊調査は 3・2 に示す調査例のように切取り片についての肉厚測定が行なわれている。

既往の腐食調査法にはいろいろな問題点があるがこのうちでも大きなものは次の点である。

その一つは腐食調査に対する基本的態度である。鋼構造物の腐食しらはマイクロ腐食速度に基づいて算出しているのが現状である。例えば鋼構造物の海水中の腐食速度は海水中に浸漬した鋼材片の腐食速度(0.1 mm/yr, 片面)で考えられている。しかし海中構造物の腐食調査を実施してみると 5 章に示すように鋼材片の腐食速度の 10 倍またはこれ以上の腐食速度となる箇所が発生するケースがある¹⁴⁾。このような腐食現象は鋼構造物全体を調査の対象としないと把握できずまた鋼構造物全体の腐食として考えなければ説明できない。例えば開・水門施設の腐食調査を計画するとき一般に門扉スキンプレートの肉厚測定または門扉各部材の肉厚測定を調査の対象としがちであるが、調査をしたところスキンプレートは左右両端および下端のエッジ部の腐食が中央部の腐食より著しい箇所がありまた各補剛部材では肉厚減量に比べて幅の減少が著しく短期間で大きな損傷を受けた例があった¹⁵⁾。また既往の腐食調査では肉厚測定箇所として肉厚の測定しやすい箇所(例えば鋼矢板構造物では断面方向は凸矢板平坦面のみ、深度方向は海水中では上下 2 深度など)を選ぶ傾向があり、また厚み計も鋼矢板平坦面のみしか適用できない厚み計を使用している。測定値についても鋼矢板凸、凹面の値が区別されておらず、また測定結果として単に深度方向の腐食傾向が示されているだけで調査構造物の環境条件(断面図など)がほとんど示されていない。これらのことはいずれも鋼構造物の腐食を鋼材片の腐食で考えている現状を反映しているものと思われる。しかし鋼構造物の腐食の実態を把握するには鋼材片の腐食でなく鋼構造物の腐食として把える姿勢が必要である。この外既往の調査では調査結果から鋼構造物の設計に反映できる意見の抽出作業がまったく行なわれていない。

もう一つの大きな問題点は厚み計の精度である。日本の港湾で使用された磁気不飽和形厚み計は表-3.1 に示すように一次電圧および探触子と鋼板間の空隙量によって肉厚測定値が異なる。いっぽう現地において磁気不飽和形厚み計による非破壊測定値と切取り片についての破壊測定値とを同一地点で比較してみると非破壊測定値の方が破壊測定値より 10 mm 程度薄かった例がある¹⁶⁾。肉厚を実際より 10 mm 薄く測定すると腐食期間が 30 年のとき鋼矢板の腐食速度(両面)は 10 mm/30 yr = 0.33 mm/yr 大きく求められることになり鋼構造物の今後の

表-3.1 厚み計による肉厚測定結果

(単位: mm)

厚み計		鋼矢板片 I		鋼矢板片 II		鋼矢板片 III		鋼矢板片 IV	
		m	σ	m	σ	m	σ	m	σ
坂田式 厚み計	7.4 V-7 A	13.10	0.07			9.19	0.04		
	8 V-7 A	12.86	0.04			8.86	0.12		
	9 V-7 A	12.96	0.20			9.17	0.09		
	10 V-7 A ¹⁾	算出不能	—			9.65	0.10		
	10 V-7 A ²⁾	10.92	0.21			6~6.5	0.05		
	10 V-7 A ³⁾	2.98	0.18			<8.00	—		
	8 V-8 A	11.99	0.08			9.26	0.04		
超音波式共振厚み計		13.10	0.14	13.04	0.15	10.41	0.16	10.48	0.18
マイクロメーター		13.162	0.150	13.110	0.153	10.319	0.230	10.389	0.208

- 1) 探触子を直接鋼矢板片に乗せたとき
- 2) 探触子と鋼矢板片間の空隙を 0.5 mm としたとき
- 3) 探触子と鋼矢板片間の空隙を 0.5 mm としたとき

表-3.2 日本の港湾における非破壊調査結果例

(単位: mm/yr)

港名	H. W. L. 上の腐食速度			潮位間の腐食速度			L. W. L. の腐食速度			海水中の腐食速度			腐食期間 (yr)	厚み計
	測定数	平均	最大~最小	測定数	平均	最大~最小	測定数	平均	最大~最小	測定数	平均	最大~最小		
A	18	0.29	0.52~0.14				14	0.12	0.23~0.06	9	0.06	0.10~0.04	24	S
B	10	0.16	0.23~0.09							17	0.10	0.25~0.03	21~24	S
C	24	0.17	0.31~0.08				24	0.15	0.20~0.09	23	0.22	0.35~0.12	21	S
D	16	0.26	0.44~0.17				13	0.24	0.41~0.15				22	S
E				13	0.12	0.21~0.06	14	0.13	0.20~0.05	24	0.08	0.17~0.01	27~30	S
F				22	0.09	0.14~0.04	22	0.09	0.14~0.03	43	0.06	0.12~0.00	29~30	S
G				4	0.07	0.13~0.00	4	0.05	0.12~0.00	4	0.04	0.08~0.00	10	T
H				7	0.17	0.28~0.02	7	0.21	0.24~0.12	14	0.20	0.28~0.18	5	T
I				10	0.16	0.24~0.10	10	0.15	0.18~0.10	20	0.15	0.20~0.10	5	T
J										36	0.07	0.12~0.02	29	T
K	14	0.08	0.25~0.01	2	0.26	0.27~0.24							34	T
L	33	0.16	0.32~0.03				19	0.17	0.25~0.10	40	0.16	0.22~0.05	27	S
M	24	0.24	0.39~0.13				15	0.18	0.35~0.13	22	0.19	0.31~0.10	20	S
N				49	0.26	0.51~0.10				84	0.21	0.51~0.08	18~22	S
O	75	0.12	0.24~0.01				73	0.15	0.28~0.04	146	0.08	0.22~0.03	22~24	S
P	8	0.12	0.23~0.06				16	0.23	0.28~0.12	36	0.17	0.27~0.03	29~32	S
Q	13	0.13	0.22~0.03				17	0.17	0.30~0.09	41	0.12	0.32~0.02	6~27	S
R	97	0.17	0.30~0.04				113	0.17	0.36~0.03	209	0.08	0.20~0.01	27~31	S
S				12	2.29	0.57~0.13				43	0.22	0.44~0.07	11	S

S: 磁気不飽和型厚み計 T: T-M 式厚み計

処置に大きく影響する。これは不飽和形厚み計の探触子が大きい付着物を除去する鋼矢板の面積は 20 cm × 30 cm 位必要で、このような広い面積についてフジツボなどの固い付着物や錆層を完全に水中で除去することはむずかしいため探触子と鋼矢板間の空隙が避けられないことに一因があると思われる。

その他の問題点としては日本の調査結果では破壊調査による腐食速度は非破壊調査による値に比べて非常に小さいこと、調査が統一された方法で行なわれていないため調査結果の比較・検討がむずかしいことなどがある。

3.2 既往の腐食調査例

日本の海中構造物の腐食調査例としては磁気式厚み計(水中用)による非破壊調査約 20 例(鋼矢板構造物)、引抜きによる破壊調査 1 例(鋼矢板構造物)、鋼材片切りによる破壊調査 3 例(鋼矢板構造物)などが報告されている。表-3.2 に非破壊調査結果を示す¹⁷⁾。ただし表-3.2 の海水中の腐食速度は海水中における上下深度の平均値である。また潮位差が小さいところでは H. W. L., H. W. L.~L. W. L., L. W. L. の各深度の区別はあまりはっきりしない。これらの調査例の肉厚測定箇所は断面方向は凸矢板の平坦面で代表しており深度方向の測定ピッチは粗であるため、従来の非破壊調査結果から断面方向および深度方向の腐食速度の違いを求めることはできない。

図-3.1 に七尾港における引抜き鋼矢板の調査結果を示す¹⁸⁾。図-3.1 では ±0~-0.5 m 間のみ腐食がひどく腐食速度(両面)は 20 mm/18 yr=1.06 mm/yr であるが

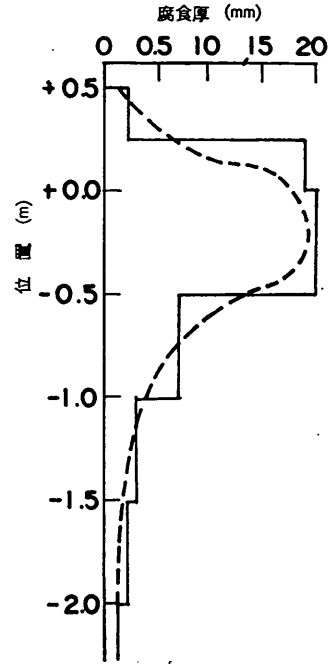


図-3.1 鋼矢板の腐食(七尾港)

表-3.3 戸畑における調査鋼矢板使用状況

測定位置	岸壁	竣工年	経過年数 (yr)	使用鋼矢板			水深 (m)
				タイプ	カタログ厚み (mm)	厚み (mm)	
1	戸畑鉱石第3バース	S 35年	4	YSP	F	9.5	-13.0
2	洞岡南岸壁 A	S 9年	30	"	IV	15.5	-7.5
3	洞岡南岸壁 B	S 9年	30	"	IV	15.5	-7.5
4	中央岸壁 A	S 10年	29	ラルゼン	IV	15.5	-6.0
5	中央岸壁 B	S 10年	29	"	IV	15.5	-6.0

表-3.4 戸畑港における測定結果

深度 (m)	戸畑鉱石第3バース			洞岡南岸壁 A			洞岡南岸壁 B			中央岸壁 A			中央岸壁 B		
	現有肉厚 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)	現有肉厚 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)	現有肉厚 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)	現有肉厚 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)	現有肉厚 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)
+ 1.0	9.57	0	0	14.87	0.63	0.021	15.83	0	0	13.80	1.70	0.59	13.81	1.69	0.058
± 0	9.52	0	0	15.17	0.33	0.011	15.53	0	0	15.74	0	0	15.06	0.44	0.015
- 4.5	9.49	0.01	0.003	15.12	0.38	0.013	15.90	0	0	15.39	0.11	0.004	15.07	0.43	0.015
- 5.0	9.52	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

-1 m の腐食速度は $1.06/4=0.27$ mm/yr 程度と減少し -1 m 以下ではさらに減じついに 0.06 mm/yr 付近に落着く。ただし図-3.1では凸面, 凹面, 側面の区別は明らかでない。表-3.3に戸畑港における調査鋼矢板の使用状況¹⁹⁾を, 表-3.4に戸畑港における破壊調査結果を示す¹⁹⁾。表-3.4に示すように調査鋼矢板の腐食速度(両面)はほとんど 0.1 mm/yr 以下である。釜石港(H.W.L.+1.49 m)で上部コンクリート被覆直下部(+1.0 m)からの切り取りを16地点で行なったところ腐食速度(両面)は平均 0.045 mm/yr であった²⁰⁾。また大野川護岸(大阪府下)では上部コンクリート中矢板肉厚を初期肉厚として水面(+0.6 m)と水面上下15 cmの計3深度から鋼材片を切り取ったところ腐食速度(両面)は平均 0.049 mm/yr であった²¹⁾。

デンマークでは1961~1962年に20港の矢板けい船岸について超音波式厚み計による非破壊調査を行ない鋼矢板の腐食傾向として図-3.2のように示している⁶⁾。この外最も腐食が激しかったところは漁港であったこと, 最大の孔食はM.S.L.より1~2 ft下のところであったこと(25~35年間で穴があき腐食速度は $0.254\sim 0.508$ mm/yr)などが報告されている。この場合も矢板凸面, 凹面の区別が明らかではない。

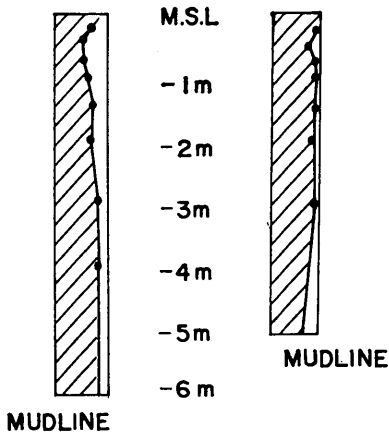


図-3.2 デンマークの港湾における鋼矢板腐食傾向

ニューヨーク港クリントン埠頭は1927年に建設された延長66 mの矢板式けい船岸で建設当初より無防食のままでありニューヨーク港では最も古い鋼構造物である。ここの海水の動きは比較的穏かであるが下水渠より汚水が流入して濁んだ状態である。図-3.3に調査鋼矢板の腐食傾向を示す¹³⁾。また観察したところM.L.W.L.

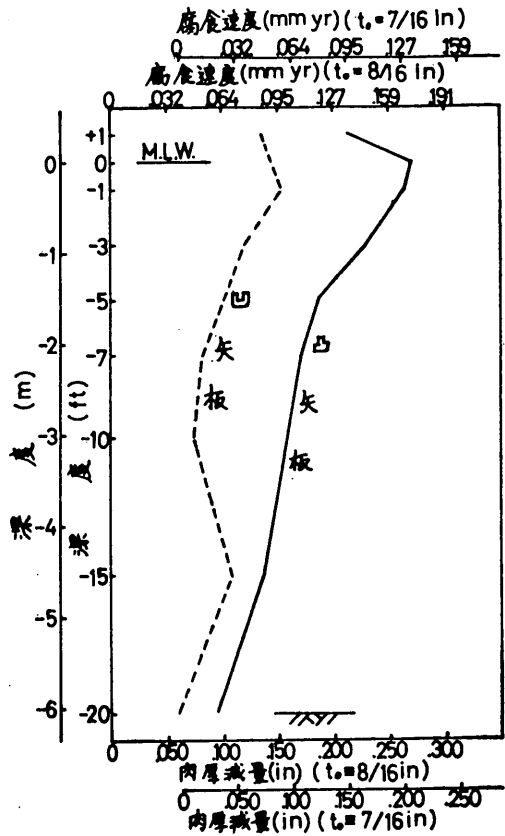


図-3.3 N.Y. 港クリントン埠頭における鋼矢板の腐食傾向(40年経過)

の2箇所穴が見えられており, 非破壊調査とは別に切り取った62個の鋼材片をマイクロメーターで肉厚を測定したところ次のような値が得られた。

初期肉厚=7/16 in=11.113 mm
 現有肉厚=0.34 in=8.636 mm
 肉厚減量=0.0975 in=2.477 mm

平均腐食速度=2.477 mm/40 yr=0.062 mm/yr(両面)ただしこれは海面上と海水中を含めた平均的な値であるから海水中から切り取った鋼材片の腐食速度は 0.062 mm/yr よりさらに小さくなる。既往の調査例のうち本調査は鋼矢板凸面, 凹面を区別した唯一の例であるが, 図-3.3のように凸面の方が凹面より腐食速度が大きい原因として調査達は過去に電気軌道が岸壁に近接して通ったため迷走電流が凸面より海水中に流出したのではないかとことをあげている。また初期肉厚をカタログ厚の7/16 inとすると腐食速度が普通考えられている値より小さいのでこれを不審として図-3.3のように初期

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

肉厚を 8/16 in として腐食速度を算出したりしている。

サンタバーバラ (カルフォルニア) 近くの H 杭棧橋 (1923 年建設) では H 杭を 23 年後に引抜く破壊調査を行なった。調査結果を表-3.5 に示す¹³⁾。調査結果から Larrabee は正常海水中に建設された鋼構造物の腐食速度は最初の 20 年が 2 mils/yr=0.05 mm/yr, 20 年以後は 1 mil/yr=0.025 mm/yr であろうと推定している。

表-3.5 鋼杭海水部分の平均腐食速度 (mm/yr)

鋼杭本数	測定カ所	測定場所	腐食期間 (yr)	肉厚減少量 (mm/yr)
20	フランジ	野 外	23.6	0.039±0.005
9	フランジ	室 内	"	0.034
9	ウェブ	室 内	"	0.044
平均値	重量測定	室 内	"	0.037±0.006

メキシコ湾 (Dry Tortugas Island) で 31 年経過 (1902 ~1933) した棧橋に用いられていた鋼杭 (φ 6 in) の腐食速度を表-3.6 のように測定している²²⁾。またメキシコ湾のドルフィンとプラットフォームより切出した鋼材片について求めた腐食速度は 図-3.4 のとおりである²³⁾。

表-3.6 メキシコ湾における調査結果

杭頭からの位置 (mm)	測定位置	31年間の腐食量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)
76.3	H.W.L. 上 0.87 m	6.350	0.206
304.8	H.W.L. 上 0.18 m	5.588	0.180
609.6	タイダル・ゾーン	1.524	0.048
914.4	L.W.L.	1.524	0.048
1,219.2	海水中	0.762	0.035

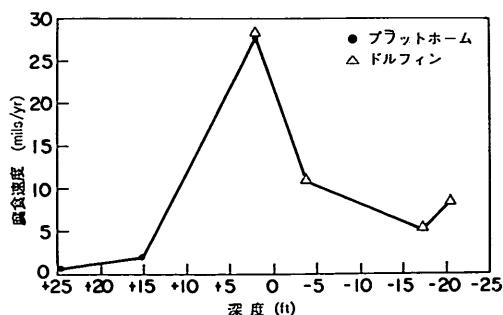


図-3.4 メキシコ湾における鋼杭の腐食傾向

The Long Island Lighting Co., (Glenwood Landing, Long Island, NY) の海水施設に使用されている鋼杭か

ら鋼材片を切取って調査したところ鋼杭干満帯 (干満差は 2.1 m, H. W. L. より 30~40 cm 下) の腐食速度は 2.4 mm/20 yr=0.12 mm/yr であった²²⁾。

パームビーチにおいて 5 通りの試験防砂堤 (1937 年建設) を 3, 5, 9 年後に肉厚測定して表-3.7 の値を得た。海底砂層面上 1~2 in のところは砂による摩擦により腐食速度は著しく大きい砂層面の変動によって腐食が幅広く起こり表-3.7 に示す平均腐食速度となった。もし砂層面が変動しないとき砂層面上 1~2 ft のところの腐食速度は 9.47 mm/yr となり 3/8 in 厚 (=9.53 mm) の鋼矢板は約 1 年で穴があくことになる²⁴⁾。

表-3.7 Palm Beach (Fla.) における調査結果

腐食環境	腐食速度 (mm/yr)	鋼矢板(3/8")の推定寿命 (yr)
大 気 中	0.28	34
タイダル・ゾーン	0.13	75
海底砂層面	2.97	3
海底砂層	0.03	375

この他米国海軍の軍港の腐食調査を 1959 年と 1965 年に行ない 図-3.5 の結果を得ている。この調査では調査

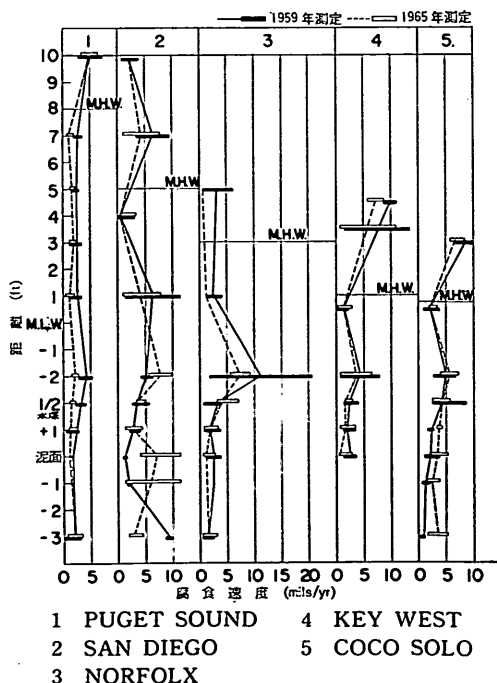


図-3.5 米海軍基地 5 地点における鋼矢板の腐食傾向

深度ごとに3枚宛の鋼材片を切り取り、成形、脱錆後に重量を測定した²⁵⁾。

4. 提案した腐食調査法

4.1 超音波式厚み計（水中用）による非破壊調査

既往の腐食調査法の問題点から海中鋼構造物の腐食調査用厚み計としては測定精度、適用性、作業性の良いものが求められる。ここでいう適用性が良い厚み計とは磁気式厚み計のように鋼矢板平坦面のみでなく鋼矢板側面、鋼管杭、H杭、山形鋼、溝形鋼などの各種鋼材の肉厚測定に適用でき、さらに平滑な鋼材面のみならず腐食面にも適用できるものを指す。また作業性が良いとは潜水夫による水中測定作業が容易なことを意味する。例えば水中測定するとき潜水夫は所定の深度に自分の身体を片手で保持しもう一方の片手で探触子を押してあるため探触子はできるだけ小型、軽量で取扱いが容易なものがよい。さらに潮流が早いところや通船による波の影響のあるところなどではできるだけ探触子の取扱いが容易で測定時間の短い方が好ましい。この外被測定箇所は予め付着物を除去しなければならないが、非破壊調査に要する時間の大半は付着物除去に費やされるため付着物を除去

する面積が小さい方が調査能率が上がる。

以上の要求を満たす厚み計として超音波式厚み計（水中用）を使用した。超音波式厚み計には共振形^{注1)}と探傷形^{注2)}がありどちらも探触子の交換によって水中用または陸上用となる。表-4.1に共振厚み計と探傷厚み計の仕様を示す。共振厚み計の長所は測定精度がよい（±1%）ことであるが、欠点は共振波形を得るために探触子を鋼材面に密着させる必要があるため平滑面にしか適用しにくいこと、探触子を鋼材面に密着させるため水晶振動子が破損しやすく破損した場合には調査を中断して振動子の取替えを行なう必要があること、良好な共振波形を得るのに現地では時間がかかること、本体が重い（14 kg）ため運搬に不便なこと、電源（100 V または 200 V）が必要なことなどである。これに対して探傷厚み計は振動子が被測定鋼材面より一定距離離れているので振動子（ジルコン酸鉛）の損傷がほとんどない、測定が短時間である、振動子を鋼材面に密着させる必要はないので平滑面のみでなく腐食面にも適用できる、測定精度がよい（メーター式またはデジタル式は±1%）、大体が軽量である（メーター式またはデジタル式では約3 kg）、電源は100 V または 内臓電池のどちらでも使用できる

表-4.1 超音波式厚み計の比較

比較項目	超音波式共振厚み計	超音波式探傷厚み計
探 触 子	φ50 mm, マグネット付	φ50 mm, マグネット付
振 動 子	水晶：振動子を直接鋼材面にあてるため損傷しやすい。取り替えが必要。	ジルコン酸鉛：振動子は鋼材面より一定距離離れているので損傷しない。
モ ニ タ ー	必 要	不 要
本 体	14 kg	3 kg*, 7 kg
ケーブルの長さ	20 m	40 m
精 度（公称）	±1%	±1%*, 3%
測 定 時 間	良好な共振波形を得るのに時間がかかる。	短時間（3"~5"）
測 定 の 可 否	あ り	な し
電 源	A. C. 100 V または A. C. 200 V	A. C. 100 V または内蔵電池

* メーター式またはデジタル式

注 1) 共振形厚み計は超音波を鋼板に放射したとき板厚が半波長の整数倍に等しくなったとき共振することを利用したもので $t = \frac{1}{2} \frac{v}{f_1} = \frac{1}{2} \frac{v}{f_n - f_{n-1}}$ の関係より鋼板肉厚 t を測定するタイプの厚み計である。

なお v : 鋼板中を伝わる音速

f_1 : 基本周波数

f_{n-1} : (n-1) 次の周波数

f_n : n 次の周波数

注 2) 探傷形厚み計は鋼材面に放射した超音波パルスが放射から戻るまでの時間は超音波が通過する距離に比例することを利用して鋼板厚みを測定するタイプの厚み計である。

(このため電源のない施設の調査にも適用できる)、メーター式またはデジタル式では厚みの読取りに個人差が入りにくいなどの特長がある。ただしオシロスコープで厚みを読取るタイプの探傷厚み計では厚みの読取りに多少の熟練を要する(すなわち個人差が生じやすい)。測定精度が多少劣る(±3%)などの短所がある。

共振厚み計も探傷厚み計もケーブル(本体と探触子間)の長さは20~25mあるが探傷厚み計ではケーブルの長さを40mとして調査した例がある。厚み計の外観を写真-4.1に示す。

いっぽう探触子(水中用)は探傷厚み計も共振厚み計もともに外径50mm程度とした。このため潜水夫は探触子を片手で取扱うことができた付着物を除去する面積も磁気式厚み計に比べて約1/25ですむ。また探触子の外周を磁石として探触子を鋼材面に押しあてると探触子が鋼材面に吸着されるようにした。このため潜水夫は探触子を鋼材面に押しあてたら探触子から手を離して待機できることになる。写真-4.2に探触子の外観を示す。

次に超音波式厚み計(水中用)の現地適用性を検討した結果超音波式厚み計(水中用)が海中構造物の非破壊調査に使用できることがわかった。図-4.1に非破壊調査結果と破壊調査結果の比較例を示す。

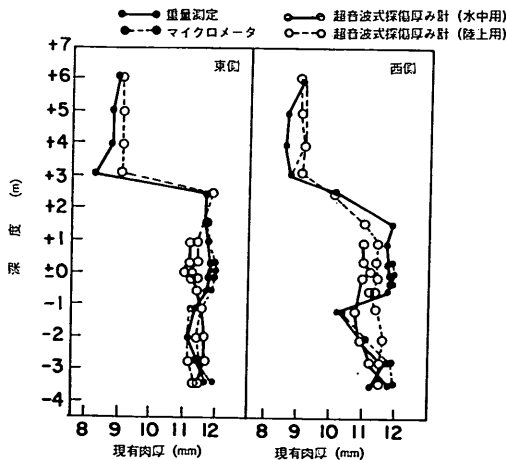


図-4.1 スキンプレートの肉厚測定値の比較

以上のことから次のような海中鋼構造物の非破壊調査法を提案した。

(1) 厚み計には超音波式厚み計(水中用)を使用する。なお腐食面に対しては超音波式探傷厚み計(水中用)が適するが、平滑面(初期肉厚の測定など)に対しては超音波式探傷厚み計(水中用)か超音波式共振厚み計(水

中用)のどちらでも適用できる。

(2) 肉厚測定箇所

マクロ腐食の観点から鋼構造物全体を調査の対象とする。断面方向は鋼矢板構造物では凸矢板と凹矢板の平坦面と側面を、鋼管杭構造物では鋼管杭断面の四方向を開水門施設では門扉スキンプレートの肉厚と左右および下端のエッジ部、各補剛材の肉厚および幅などを測定の対象とする。深度方向はH.W.L.直上部、H.W.L., H.W.L.~M.S.L.間、M.S.L., M.S.L.~M.L.W.L.間(15~20cmピッチ)、M.L.W.L., -0.5m, -1m, -1m~海泥面の間(1mピッチ、ただし水深が浅い場合には0.5mピッチ)とする。なお上部コンクリートがある場合にはコンクリート直下を肉厚測定の基点とする。この外必要に応じて海泥中についても海泥面下0.3~0.5mまで海泥を除去して肉厚を測定する。各測定深度は調査港のH.W.L., M.S.L.などの潮位を確かめて調査構造物上からレッドを下ろして潜水夫に明示する。この場合構造物の天端またはコンクリート下端などの深度が明らかなきにはこれらを測定深度算出の基点として利用する。また潜水夫への測定深度の指示、確認は潜水具に付いている水中電話を利用して行なう。

延長方向の肉厚測定箇所はできる限り密な方がよいが稼働中の施設ではけい船などによる制約があるので一つの目安として鋼矢板構造物では凸凹矢板1組を対象として20mピッチ、杭式構造物では杭間隔の5倍(ただし杭間隔が3.0m以下の場合は7倍)、セル式構造物では各セルごと、ポンツーンでは各ポンツーンごとに両側各3個とする。

(3) 付着物除去

各測定点ごとに7cm×7cmの面積について付着物を除去する。付着物の大半はハンマで鋼材面を傷つけないように注意して叩き落とす。次にスクレーパーで残っている付着物をこさぎ落とす。付着物の除去がなお不十分なきはワイヤブラシ、金剛と石、ケレンハンマーなどを利用して十分に地肌面が出るようにする。なお水深が深くなったり構造物の陰になったり調査が朝夕にかかるとき、または汚染海水中などでは付着物除去作業に潜水夫は水中用懐中電灯を使用すると便利である。

(4) 肉厚測定

厚み計本体を調査構造物上部に設置して基準鋼板(調査鋼材と同材質で肉厚既知の鋼材片)を用いて予め調整しておく。なお水中用探触子を使用する場合は探触子を容器に入れた海水中に浸漬して調整を行なう。調整がす

んだら探触子を海水中に下ろして潜水夫が所定の個所にこれを押しあてる。押しあてると同時に探触子は被測定面に吸着し波による海水の動きによっても鋼材面からずれないため、潜水夫は吸着と同時に探触子から手を離すかまたは握りをゆるめてもよい。探触子の被測定面への吸着と同時に陸上に設置してある厚み計本体で肉厚を読取る。肉厚の読取りがすんだら水中電話で潜水夫に合図して吸着している探触子を鋼材面からはずさせ再び同一個所に押しあて吸着させる。このように同一個所について3回測定を繰返す。なお3回の測定値のバラッキが0.5 mm を越すときはさらに測定を3回繰返す。

(5) 肉眼観察

付着物除去、探触子押しあて作業のとき潜水夫に付着物、鋼材表面の凹凸状況を肉眼観察させ、また必要に応じて水中撮影を行なう。この外肉厚測定値のバラッキが大きいきには鋼材面の状態を報告させる。なお肉眼観察ができないほど暗いときには手さぐりで鋼材面の状態を調べさせる。

(6) 環境調査

必要に応じて採水して水質 (pH, 色相, DO, 比抵抗, Cl⁻ など) を分析する。また構造物位置図, 断面図, 水質および土質調査資料などを収集する。

(7) 非破壊調査結果をチェックするため現地鋼構造物の機能に差支えない範囲で4.2の鋼材片の切り取りを行なうことが望ましい。

4.2 切り取り片または引抜き材について肉厚測定する破壊調査法

鋼材片を切り取って肉厚を測定する場合

(1) 鋼材片の切り取り個所を潜水夫に明示する。

(2) 切り取り個所は8 cm×8 cm位の面積の付着物を除去して鋼材片を切り取る。海面上での切断にはガス切断機を使用するが水中では6 cm×6 cm寸法の形板(木製)を押しあてて形板の周囲を直流電弧溶接機で入念に切り取る。なお6 cm×6 cmの切り取り寸法は稼動中鋼構造物についての最小寸法であって改造その他の理由でさらに大きく切取れる場合には10 cm×10 cm程度切取る。切り取りに際しては潜水夫に鋼材片の表裏, 上下を間違えないように注意しておく。潜水夫より受取った切り取り片は直ちに表裏を写真(カラー)撮影する。なお非破壊調査結果をチェックするために切取るときには切り取り前に厚み計で切り取り個所の肉厚を測定しておく。

(3) 鋼材片を切り取った個所は切り取り後直ちに補修する。補修は予め切り取り片より2~3 cm大きい寸法の鋼

板(肉厚は母材より2~3 mm厚く母材と同材質のもの)を準備しておき切り後直ちに水中溶接によって入念に行なう。

(4) 切り取り鋼材片は試験機関へ送付する。試験機関ではクエン酸アンモン10%溶液に浸漬して脱錆し, 脱錆後両球形マイクロメーターで肉厚を基盤目状に測定する。次に成形して重量を測定して(2)式より肉厚を算出する。

(5) 切り取り鋼材片の材質を分析する。分析項目はC, Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Cuである。

鋼材を引抜いて肉厚を測定する場合

(1) 鋼材の引抜きは鋼構造物の改造または撤去などの場合しかできないので機会があればできるだけ多く引抜くことが望ましい。鋼構造物に集中腐食が発生している場合には鋼材の引抜きがむずかしいこともあるので注意を要する。例えば鋼矢板構造物で腐食傾向(a)(図-5.2参照)が発生している場合にはM.L.W.L.直下の凸矢板平坦面に穴があいているので凹矢板から先に引抜き次に凸矢板を引抜くとよい。この場合凸矢板はM.L.W.L.直下の平坦面に穴があいていても同じ深度の側面(爪部を含む)がほとんど無傷が残っているので引抜きが可能である(写真-5.4参照)。また鋼管杭構造物では腐食傾向が(a)の場合M.L.W.L.直下部の鋼管杭面に穴があきひどいときには輪切り状態となる。このような場合には穴の個所で切れるのでM.L.W.L.下の鋼管杭の回収には工夫を要する。例えばガイドパイプを引抜く鋼管杭にかぶせてジェットで海泥をゆるめてから鋼管杭を回収するとよい。この外開・水門施設では門扉背後の補剛材が複雑なためドライにして部材を切り取る。

回収材は地面に横たえ(海上作業の場合は台船上に横たえることもある)直ちに全長にわたって肉眼観察および写真(カラー)撮影を行なう。

(2) (1)が終了したら直ちに上水で水洗し付着物を除去する。水洗が遅れて付着物が乾燥すると脱錆作業が困難となり, 特にこの傾向は海泥付着部分で著しい。水洗後測定個所ごとに15 cm×15 cmの範囲の付着物を除去する。付着物除去の要領は非破壊調査に準ずるがさらに肉眼で確かめて完全に海洋生物および錆生成物を除去する。

(3) 付着物を除去した個所の肉厚を超音波式厚み計で測定する。この場合陸上用探触子を使用する。なお回収した鋼矢板では陸側面から測定する方が鋼材面の凹凸が少ないため測定が容易である。

(4) 引抜き鋼材から室内測定用の鋼材片(10cm×10cm程度)をガス切断機で切取る。切取り鋼材片は原位置と表裏および上下の区別を明確にして表裏を写真(カラー)撮影する。撮影後は鋼材片を試験機関へ送付する。

(5) 鋼材片切取りの(4)、(5)に準じて肉厚測定および材質分析を行なう。

タイロッドの外径測定

タイロッドの外径測定はノギスで測定するかまたは重量測定結果より算出する^{注)}。タイロッドの外径測定箇所は調査タイロッドごとに鋼矢板(上部コンクリート中に埋込まれている場合はコンクリート)より1.0mピッチとし、外径測定は3方向について行なう。また鋼矢板(またはコンクリート)より0.5mの個所のところも外径を測定する。ただし測定箇所がリングジョイントやターナックルにかかるときはそれを避けるものとする。

4.3 鋼構造物の腐食傾向の分類に基づく簡易調査法

改造または撤去する鋼構造物でも工期など現地の都合で定量的な腐食調査が出来ないため止むを得ずそのまま埋殺しにされるケースがある。また定量的な調査は鋼構造物の補修、改造、撤去などの事態とならなければ断続的な実施しないケースも多い。したがってもっと簡易な腐食調査法があれば現地に必要なときに何時でも手軽に実施でき、調査した鋼構造物の補修、改造、撤去などの判断資料として役立つことになる。

これに対して海中構造物では5章に述べるように特定個所に集中腐食が発生しここだけの損傷のために構造物が使用不能となる傾向がある。また5章では集中腐食個所の損傷状況によって鋼構造物の腐食傾向を分類した。

従って、集中腐食個所を定期的に観察すれば鋼構造物の腐食傾向が判定でき腐食傾向に基づいての腐食対策を取得する。例えば鋼矢板構造物でH.W.L.下の集中腐食の発生状況によって腐食傾向は(a)~(e)の5通りに分類される(図-5.2参照)。このため鋼矢板構造物では調査構造物が(a)~(e)のどの腐食傾向に該当するかを観察すればよい。集中腐食はM.L.W.L.直下(腐食傾向(d)のみは残留水位直下)に発生するため最干潮時に海側から観察または写真(カラー)撮影すれば鋼

矢板の腐食傾向が判別できる。最干潮時に観察、写真撮影する方法は鋼矢板構造物のみでなく鋼管杭構造物、閘・水門施設などにも応用できる。したがって海中構造物の簡易調査法として年一回最干潮時に海側から観察または写真(カラー)撮影することを提案した。なおこの方法は長期間経過した鋼構造物では穴の有無によって腐食傾向が判断できるし、新しい鋼構造物でもM.L.W.L.直下の集中腐食個所が赤橙色の錆色をしているかどうかによって腐食傾向が判断できる。

簡易調査が必要となったときも潮位が高ければM.L.W.L.直下が海水面上に露出しない。このような場合には小舟で調査構造物に接近して海水面下に没しているM.L.W.L.直下の鋼材面を観察したり竹竿で突いて穴の有無、穴の発生深度を確かめることによって腐食傾向を判定できる。また調査鋼構造物があまり長期間経過していないときには集中腐食個所の発錆状況(赤橙色の錆の有無)によっても腐食傾向が判断できる。

簡易調査法で鋼構造物の腐食傾向を判別する場合には腐食傾向(5章、鋼矢板では図-5.2)、腐食傾向の発生条件(6章、鋼矢板では表-6.5)を参照すると便利である。なお簡易調査法による定性的データは7.1に示すように定量的データと同様に腐食傾向の推定および集中腐食対策への資料として利用できることがわかっている。

5. 提案した調査法による腐食調査結果

5.1 調査鋼構造物

図-5.1に調査港の位置を示す。調査した鋼構造物は鋼矢板構造物、鋼管杭構造物、閘・水門施設である^{26),27)}。表-5.1~表-5.6に鋼矢板構造物を、表-5.7~表-5.8に鋼管杭構造物を、表-5.9に閘・水門施設を示す。

5.2 鋼矢板構造物の腐食実態

5.2.1 H.W.L.下の鋼矢板の腐食傾向

鋼矢板構造物の腐食傾向をH.W.L.下について大別してみると図-5.2の5通りに分類できる。

(1) 腐食傾向(a)

北浜港 -4.5m岸壁(表-5.1参照)では34年経過後に改造することになったため破壊調査と非破壊調査を行った。付図-5.1に-4.5m岸壁の断面図を示す。-4.5m岸壁では凸矢板平坦面(以下凸面という)の+0.46~-0.2mの範囲のみ腐食が著しくこの個所では全凸矢板170枚のうち33枚(約20%)に穴があいており、残り80%の凸面でもこの深度では赤橙色の発錆が認められた。引抜き鋼矢板についての測定結果を図-5.3、付

注) 次式より外径を算出する。

$$D(\text{mm}) = 20 \sqrt{\frac{W}{3.14 \times 7.86 \times h}}$$

ただし W:重量(g)

h:成形片の厚み(cm)

7.86:鋼材の密度(g/cm³)

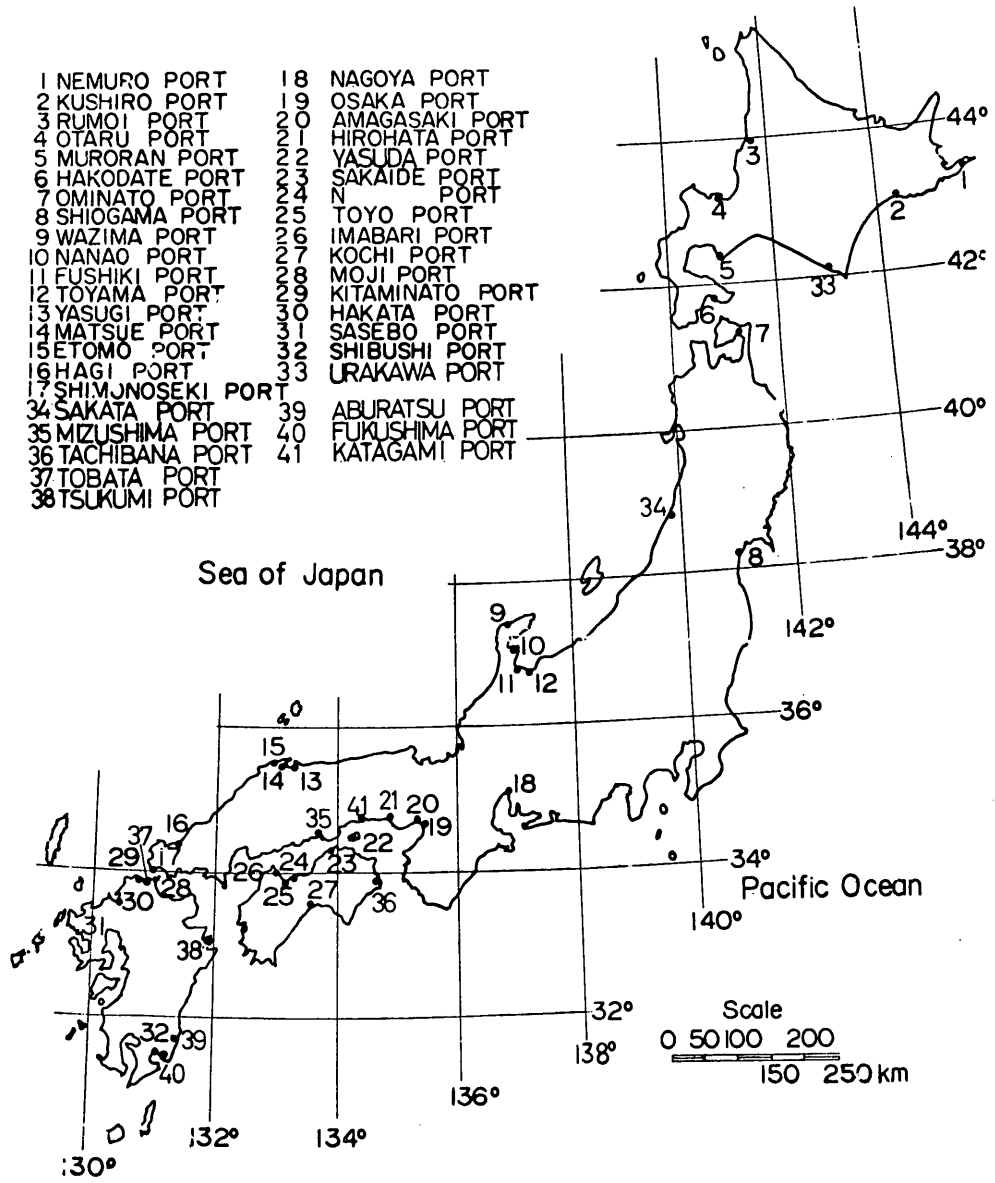


図-5.1 調査港の位置

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

表-5.1 鋼矢板腐食傾向 (a) (表-6.5 ①, ②に該当)

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板 タイプ	初期肉厚 (mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食 期間 (yr)
				平坦部	側面部					
函館港	西浜埠頭G岸壁	-3.6	ラルゼン I	7.8	7	200	S. 5	39	(塗装)	39
"	万代町船溜前面	-2	" III	14.2	8	160	S. 8	36	なし	36
"	万代町船溜	-2.1	" I	7.8	7	474	S. 7	37	"	37
			" II	10.5	8					
"	万代町岸壁	-3 ~-3.5	" III	14.2	8	225	S. 5	39	"	39
			Y S P I	8	6	91	S. 6	38		
"	浅野町岸壁	-2.5 ~-4.3	" I	8	6	91	S. 6	38	"	38
室蘭港	中卯埠頭	-2.4	TR II	10 ₉	6	73	S. 11	33	"	33
浦河港	第一物揚場	-2	ラルゼン Ia	7		68.9	S. 4~5	28~29	"	28~29
"	第三 "	-2	" Ia	7		104	S. 4~5	28~29	"	28~29
根室港	-4m物揚場	-2	TR II	10 ₉	6	30			"	
"	-5m物揚場	-1.5	" II	10 ₉	6	8.4			"	
留萌港	南岸土留護岸	-2.0	" I	7.5	6	17	S. 2	45	"	45
"	南岸地区護岸 (旧矢板)	-2.0	" I	7.5	6		S. 5	42	"	42
七尾港	11号物揚場	-2.0	ラルゼン I	8	7	217.0	S. 7	39	"	39
"	12号 "	-2.0	" I	8	7	170.0	S. 7	39	"	39
"	13号 "	-1.5	" Ia	7	6	279.3	S. 11	35	"	35
"	14号 "	-1.5	" Ia	7	6	150.0	S. 11	35	"	35
輪島港	乙物揚場	-2.5	U 型			118	S. 7	38	"	38
恵曇港	2号岸壁	-2.7	TR II	10 ₉	6	166.3	S. 8	35	"	35
"	佐陀川護岸	-2.0	" II	10 ₉	6		S. 8	35	"	35
N 港	No. 1	-2	ラルゼン I	8	7	164	S. 3	27	"	27
"	No. 2	-2	" I	8	7	23.5	S. 3	27	"	27
"	No. 3	-2	Y S P II	10.5	6.5	21.5	S. 25*	4	"	4
"	No. 4	-1	" II	10.5	6.5	11.8	S. 25*	4	"	4
"	No. 5	-2	ラルゼン I	8	7	45	S. 3	27	"	27
"	No. 6	-2	" I	8	7	271	S. 3	27	"	27
"	No. 7	-2	" IIa	8	7	132.8	S. 11	19	"	19
北淡港	-4.3m岸壁	-4.5	" II	10.5		136	S. 10	34	(塗装)	34
佐世保港	-3m物揚場	-3							なし	
油津港	第一物揚場	-1.8	" IIa	8	7	114.8	S. 6	21	"	21

* S. 25年に改造

表-5.2 鋼矢板腐食傾向 (b)

(1) 腐食傾向 (b)-1 (コンクリート被覆が M. S. L. 上のケース, 表-6.5③に該当)

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)
				平坦部	側面部					
函館港	海岸町 A 岸壁	- 6	ラルゼン III	14.2	8	184	S. 3	41 42	なし	41 42
秋田港	北埠頭壁 -4.6m 岸壁	- 4.6	" II	10.2	8.7	122	S. 11	37	"	37
"	南埠頭壁 -4.6m 岸壁	- 4.6	" II	10.2	8.7	122	S. 9	39	"	39
塩釜港	中埠頭	- 4.6	" II III	10.2 14.2	8.7 9.2	192	S. 6	38	"	39
広畑港	西浜護岸	- 4	YSP III	13		200	S. 14	28	"	28
片上港	同和 業 第 2 けい 船岸	- 3.6	TR II	10 9	6	254	S. 5	42	"	42
水島港	A けい 船岸	- 3.5	ラルゼン IIIa	11	8	76	S. 10	37	"	37
坂出港	-7m 岸壁	- 7.0	YSP III	13		275	S. 22	25	"	25

(2) 腐食傾向 (b)-2 (コンクリート被覆が M. S. L. 下のケース, 表-6.5④に該当)

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)
				平坦部	側面部					
富山港	-3m 物揚場	- 3.0	YSP II	10.5		180	S. 33	11	なし	11
伏木港	左岸 3 号岸壁	- 5.0	クロックナ III	10	8		S. 8	37	"	37
安来港	-3m 物揚場	- 3	YSP III	13		130	S. 8	35	"	35
萩港	-3.5m 物揚場	- 3.5	U 形			40	S. 7	38 39	"	38 39

表-5.1~付表-5.3に示す。凸面の穴が34年であいたとすると穴の個所の腐食速度(両面=海側+陸側)は10.5 mm/34 yr=0.31 mm/yr となるが穴は調査の時以前にあいていたので穴があくまでの期間を15, 20, 25, 30年と仮定すると腐食速度はそれぞれ0.70, 0.53, 0.42, 0.35 mm/yrとなる。このように凸面の+0.5~-0.2m間の腐食速度は大きいがこの深度以外の凸面海水中の腐食速度は0.05 mm/yr以下と小さい。これに対して凹面海水中の腐食速度は深度方向によって大差なく0.05 mm/yr以下である。いっぽう側面では凸矢板の場合+0.5~-0.2m間の腐食速度(両面)は0.1 mm/yr程度であるがこの深度以外の海中では0.05 mm/yr以下であり、また凹矢板側面の海中腐食速度は0.05 mm/yr以下である。また海泥中の腐食は凸矢板, 凹矢板とも極めて軽微であり34年前の矢板面にあった特許番号等の記号はほとんど無傷のままそっくり残っていた。海泥中

の腐食速度は0.01 mm/yr(片面)以下であった。写真-5.1に凸面, 凹面の肉厚が十分残っている様子を、また

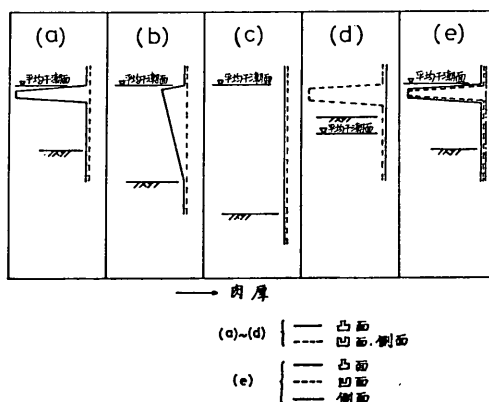


図-5.2 鋼矢板の腐食傾向

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

表-5.3 鋼矢板腐食傾向(c)

(1) 腐食傾向(c)-1 (水深が深く、コンクリート被覆が M. S. L. 上のケース、表-6.5⑤に該当)

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)
				平坦部	側面部					
函館港	西浜埠頭E岸壁	-7.2	ラルゼン IV	15.5	9	198	S. 4	40	なし	40
"	" F岸壁	-6.3	" III	14.2	8	104	S. 5	39	"	39
大湊港	下北埠頭	-5.5	" 30	10.5	10		S. 3	40	"	40
秋田港	北埠頭 -7.6m岸壁	-7.6	YSP IV	15.5		227	S. 10	38	"	38
安来港	-4.5m岸壁	-4.5	" III	13		88	S. 8	35	"	35
安田港	安田岸壁	-4.0	U型 I, III			130	S. 24	22	"	22
橘港	Aけい船岸	-6	YSP III	13		65	S. 14	32	"	32
広畑港	西浜岸壁	-7.5	" IV	15.5		175	S. 14	28	"	28
"	汐入 "	-7.5 ~-9.0	" IV V	15.5 22		400 360	S. 14	28	途中より 電防	28 25 22
"	鶴田 "	-9.0	" V	22		423.5	S. 14	28	なし	22
"	鴨田 "	-7.5	" V	22		762	S. 14	28	"	22 23
"	夢前 "	-7.5 -4.5	" IV III	15.5 13		240 156	S. 14 S. 14	28 28	"	21 21
博多港	水陸連絡設備	-6.5	" IV	15.5		70	S. 18	25	"	25
"	中央埠頭	-7.5	" V	22		32	S. 38	5	"	5
佐世保港	-4m物揚場	-4	" IV	15.5		200	S. 23	19	"	19
津久見港	小野田第2工場 大平岸壁	-8.0	ラルゼン V	21	11	119.2	S. 9	38	"	38
"	" 原燃料岸壁	-6.0	" IIIa IV V	11 15.5 21	8 9 11	145.3	S. 9	38	"	38

(2) 腐食傾向(c)-2 (水深が深く、コンクリート被覆が L. W. L. 下のケース、表-6.5⑥に該当)

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)
				平坦部	側面部					
小樽港	既町岸壁	-7.5	ラルゼン IIIa	11		55	S. 9	35	なし	35
留萌港	南岸岸壁	-6.0 ~-7.0	FSP III IV	13 15.5		61.0 54.8	S. 38	9	"	9
富山港	-7.5m岸壁	-7.5	TR V	19 17.5	13	105	S. 9	34	"	34
萩港	-7.3m岸壁	-7.5	" V			100	S. 7	38	"	38

(3) 腐食傾向(c)-3(水深が深く、コンクリート被覆も海水中に深く没しているケース、表-6.5⑥に該当)

港名	施設名	水深(m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長(m)	施工年	経過期間(yr)	防食の有無	無防食期間(yr)
				平坦部	側面部					
大阪港	5号岸壁	-9	ラルゼン V	20.5	12	360	S. 9	33	なし	33
"	8号"	-7.5	" V	20.5	12	336	S. 4	38	"	38
"	梅町西"	-7	" IV	22	14	250	S. 5	37	"	37

(4) 腐食傾向(c)-4(水深が浅くて、コンクリート被覆が M. S. L. 下のケース、表-6.5⑥に該当)

港名	施設名	水深(m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長(m)	施工年	経過期間(yr)	防食の有無	無防食期間(yr)
				平坦部	側面部					
尼崎港	第一閘門	-3.3 ~-5.6	YSP II	10.5			S. 28	17	途中電防	
高知港	弘化台揚場	-3.0	" III	13		30	S. 33	13	なし	13
志布志港	物揚場	-0.3 ~-0.6	" II	10.5		100	S. 12	30	"	30
"	斜面物揚場	-1 ~-1.4	TR I	7.5		70	S. 6	36	"	36
博多港	長浜物揚場	-4	YSP III	13		100	S. 28	15	"	15
福島港	-3.0m物揚場	-3.0	U 型				S. 7	40	"	40

表-5.4 鋼矢板腐食傾向(d)(表-6.5⑧に該当)

港名	施設名	水深(m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長(m)	施工年	経過期間(yr)	防食の有無	無防食期間(yr)
				平坦部	側面部					
G 港	護岸	0	YSP II	10.5			S. 30	13	なし	13

表-5.5 鋼矢板腐食傾向(e)(表-6.5⑨に該当)

港名	施設名	水深(m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長(m)	施工年	経過期間(yr)	防食の有無	無防食期間(yr)
				平坦部	側面部					
小樽港	信香町揚場	-2.4	ラルゼン I	8	7	40.6	S. 7	40	なし	40
留萌港	南岸土留護岸	-4.0 ~-6.0	" II	10.5	8	40.3	S. 2	45	"	45

表-5.6 その他(木材接触による影響)

港名	施設名	水深(m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚(mm)		延長(m)	施工年	経過期間(yr)	防食の有無	無防食期間(yr)
				平坦部	側面部					
今治港	浅川荷揚場	-1.5	ラルゼン II	10.5	8	79.7	S. 6	40	なし	40

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

表-5.7 鋼管杭腐食傾向 (a), (b)

港名	施設	鋼管杭寸法			材質	竣工	経過期間 (年)	防食
		D (mm)	t (mm)	l (m)				
東京港	ドルフィン	508	9	22~23	STK 41	S. 37.3	12	塗装
	棧橋	406	6	18~22	STK 41	S. 37.3	12	塗装

表-5.8 鋼管杭腐食傾向 (c)

港名	施設名	水深 (m)	鋼管杭				延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)	
			ϕ (mm)	t (mm)	l (m)	材質						
小名浜港	2号埠頭 2号岸壁	-10	508	9.5	20.5 21.0	STK41	185	S. 39	9	一時電防		
	須磨船積棧橋	-3 ~-6	700	8	20 23.5	"		150	S. 38	8	なし	8
	"	"	500	7	19.5 23.0	"			S. 38	8	"	8
下関港	第1突堤先端 ドルフィン	-9.0	500	12	20	"		S. 42	8.5	"	8.5	
博多港	須崎棧橋 No. 1	-7.5	750	11	28.3	Yaw Ten	555	S. 39	4	"	4	
	" No. 2	-10	700	11	24	"		S. 40	3	"	3	
	" No. 3	-10	700	12.7	24	"		S. 41	2	"	2	
	" No. 4	-10	700	9	24	"		S. 42	1	"	1	

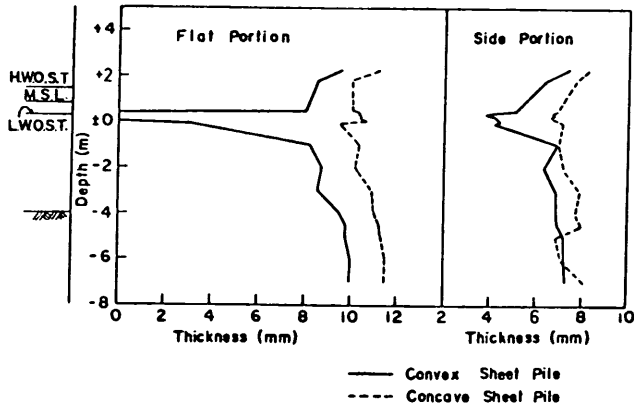


図-5.3 北浜港 -4.5m 岸壁における鋼矢板腐食傾向 (34年経過)

表-5.9 閘・水門施設

閘水門施設一覧

	尼崎港第1閘門	蓬川水門
位置	尼崎市西海岸町	同 左
計画外潮位(O.P.)	+5.50m	+5.50m
計画内潮位(O.P.)	+1.50m	+1.50m
計画天端高(O.P.)	前扉+7.00m後扉+3.50m	+7.00m
計画敷高(O.P.)	-5.50m	-4.00m
設計震度(水平)	0.2	0.2
門扉型式	セクターゲート	セクターゲート
有効幅員	12.0m	3.9m
門扉高さ	前扉 12.50m 後扉 9.00m	11.0m
門扉重量	前扉 後扉	
巻上電動機	前扉 15KW(20HP) 2台	15KW(20HP) 2台
〃	後扉 10KW(13HP) 2台	
巻上揚程	15m	
開閉所要時間	1分30秒~2分	1分30秒
電源	買電並発電	同 左
操作方式	遠方及び直接	同 左
自家発電機	200K.V.A 30K.V.A. × @ 1台	第1蓬川兼用
施工年度	昭和28年度	昭和27年度

排水機施設一覧

	東浜第1排水場	東浜第2排水場
位置	尼崎市西海岸町	尼崎市西海岸町
建屋規模	449.6m ²	549.8m ²
ポンプ型式	横型可動翼軸流	横型斜流
口径・台数	φ 2,000mm 4台	φ 2,000mm 4台
排水量	7 m ³ /s × 4 = 28 m ³ /s	7.5 m ³ /s × 4 = 30 m ³ /s
回転数	130 rpm	88 rpm
計画実揚程	1.6m	1.7m
計画全揚程	2.1m	2.4m
内水位(O.P.)	+1.50m	+1.80m~+0.50m
外水位(O.P.)	+5.50m	+5.00m~+1.00m
ディーゼル機閥型式	同 左	同 左
軸馬力	275 HP	350 HP
回転数	375 rpm	600 rpm
起動方式	同 左	同 左
歯車減速装置	4 基	4 基
電源	同 左	同 左
操作方式	同 左	同 左
自家発電機	閘門兼用 200 K.V.A.	同 左
観測設備	自記検潮所	自記検潮所
施工年度	昭和29年度	昭和38年度

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

写真-5.2に +0.5~-0.2 m 間の凸面肉厚の急減する模様を凹面肉厚と比較して示す。また +0.5~-1.0 m 間の爪部が凸、凹矢板ともあまり損傷していない様子を写真-5.3に示す。この外凹矢板はもちろんのこと凸矢板でも側面がほとんど残っていたため引抜きが可能であったことを写真-5.4に示す。

北湊港 -4.5 m 岸壁では 図-5.3 のような腐食傾向である。すなわち凸面では M.L.W.L. 直下付近に腐食が集中するがさらに深度が下ると、凹面、側面の腐食量に近似する。いっぽう凹面と側面の腐食量は深度によってほとんど大差ない。このような鋼矢板の腐食傾向を (a) とする。腐食傾向 (a) の現象は表-5.1 に示す鋼矢板構造物で発生した。腐食傾向 (a) の腐食速度 (両面) は海水中では凸面の集中腐食箇所 で 0.5~1.0 mm/yr, その他の箇所 で 0.1 mm/yr 以下であり海泥中は 0.05 mm/yr 以下である。集中腐食の発生箇所は断面方向は 図-5.4 に示すように凸面の幅一杯か凸面の外に側面の一部にもおよぶ。これに対して深度方向は表-5.10 に示すようにその港の M.L.W.L. 下数 10 cm の範囲内である。恵曇港 2 号岸壁では全凸面 (362 面) の 51% が凸面の幅一杯に穴があいている。このうち佐陀川寄り (凸面 102 面) では 82%, 佐陀川寄りでないところ (凸面 260 面) では 39% の穴の発生率であった。なお 2 号岸壁でも穴が発生していない凸面の穴の深度に相当する箇所は

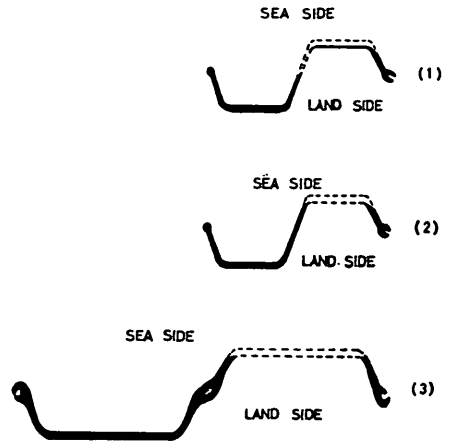


図-5.4 鋼矢板の集中腐食箇所 (断面方向)

橙色をしておりハンマで叩くと容易に穴があく状態であった。腐食傾向 (a) の穴の発生状況例を写真-5.5 に示す。腐食傾向 (a) は表-5.1 に示すように北海道から九州にかけて各地で発生している。腐食傾向 (a) が発生すると 10 数年未満 (付表-6.1 の II 形相当品使用の場合) で集中腐食箇所に穴があきこの穴から裏込み材が流出して上部工の沈下, 陥没を起こす。

(2) 腐食傾向 (b)

塩釜港中埠頭では 39 年後に改造することになったの

表-5.10 調査港の潮位と集中腐食の発生深度

港名	H.W.L. (m)	M.S.L. (m)	L.W.L. (m)	集中腐食の発生深度 (m)
根室港	1.514	0.848	0.051	+0.4~-0.3 (大半は±0.0~-0.3)
小樽港	0.417	0.256	-0.002	-0.09~-0.71
留萌港	0.493	0.185	-0.089	+0.2~-0.9
室蘭港		1.010		+0.5~±0.0
函館港	1.052	0.674	0.040	+0.3~-1.0
浦河港	1.520	0.930	0.200	
七尾港	0.60	0.21	0.13	+0.05~-0.25
輪島港	0.60	0.18		+0.16~-0.1
恵公港				+0.3~±0.0
塩釜港	1.77	1.25	0.50	+0.5~±0.0
坂出港	3.216	1.800	0.256	+0.9~-2.0
N 港	(3.72)	(1.99)	(0.14)	+0.64~-0.36
北湊港	1.85	0.95	0.15	+0.5~-0.2
佐世保港		1.647		+0.9~±0.26
油津港	2.33	1.48	0.34	+1.0以下~±0.0

で破壊調査と非破壊調査を行なった。付表-5.2に中埠頭の断面図を示す。中埠頭は付図-5.3に示すように地盤沈下がひどくまた埋没によって水深が当初の -4.5 m より浅くなっていた。なお付図-5.3で鋼矢板 No. 1~No. 9はラルゼンⅢ形, No. 10~No. 36はラルゼンⅡ形が使用されていた。回収した鋼矢板1組(凸, 凹矢板)についての測定結果を付表-5.4, 付表-5.5に示す。付表-5.4, 付表-5.5より中埠頭における鋼矢板の腐食傾向を図示すると図-5.5(平面図), 図-5.6(側面)のようになる。中埠頭では沈下のひどい鋼矢板 No. 1~No. 19は付図-5.4に示すように建設時 +1.75 m の矢板部分は調査時には +0.50 m となりこの深度では凸面の腐食がひどかった。しかし沈下の少なかった鋼矢板 No. 27~No. 36では建設時の +1.75 m は調査時に +1.6 m 付近であったが腐食はひどくなかった。従って図-5.5に示す +0.5 m の凸面の腐食速度が大きい現象は海面上で発生して沈下したのではなく沈下後に海水中で発生したものと考えられる。なお塩釜港における +0.50 m は M. L. W. L. に相当する。

塩釜港中埠頭における鋼矢板の腐食傾向は図-5.5, 図-5.6に示すように凸面では M. L. W. L. 直下付近の腐食

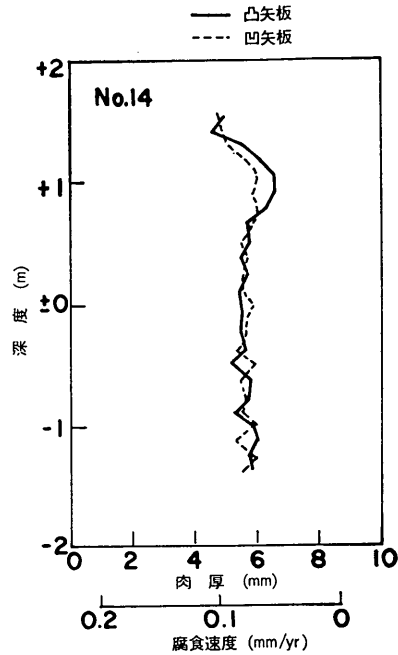


図-5.6 鋼矢板側面部の腐食量 (マイクロメーターによる)

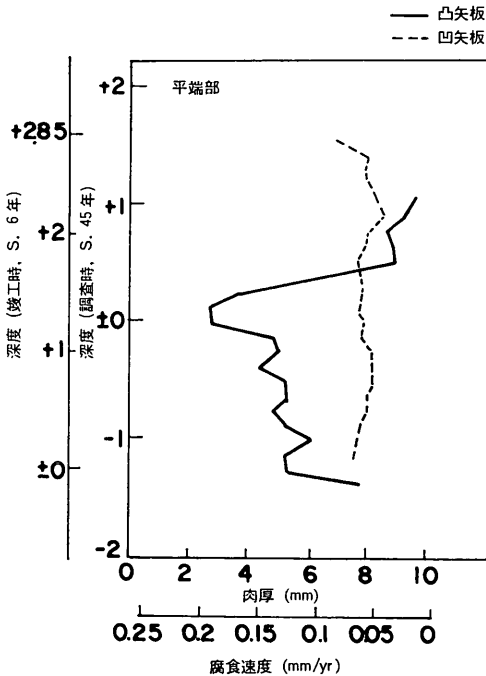


図-5.5 鋼矢板の腐食量 (鋼矢板 No. 14, 重量測定による) (+2.05 m・矢板天端高)

速度が最も大きく深度が下がるにつれて腐食速度は漸減し凹面, 側面の値に近づく。いっぽう凹面, 側面の腐食速度は深度によって大差ない。このような鋼矢板の腐食傾向を(b)とする。腐食傾向(b)は表-5.2に示す調査鋼矢板構造物で発生しており, 腐食速度(両面)は M. L. W. L. 直下付近の凸面は 0.1~0.2 mm/yr で深度が下がるにつれて漸減するが凹面, 側面では深度に関係なく 0.1 mm/yr 以下である。したがって腐食傾向(b)では M. L. W. L. 直下付近の凸面の肉厚減量は40年後でも 4~8 mm 程度でラルゼンⅡ形相当品では40年経過しても穴があくまでにはいたらない。また図-3.3に示すニューヨーク港クリントン埠頭の鋼矢板の腐食傾向は(b)に該当する¹²⁾。

(3) 腐食傾向(c)

富山港 -7.5 m 岸壁では34年後に改造することになったため破壊調査を行なった。付図-5.5に -7.5 m 岸壁の断面図を示す。付表-5.6に水中切断した鋼矢板片についての測定結果を示す。付表-5.6に示すように -7.5 m 岸壁の鋼矢板の腐食速度(両面)はコンクリート中鋼矢板の肉厚を初期肉厚とした場合凸面は 0.05~0.07 mm/yr, 凹面は 0.04~0.06 mm/yr であり, 断面方向

(凸面, 凹面), 深度方向による腐食速度差はほとんどない。この傾向を 図-5.7 に示す。図-5.7 に示すように断面方向, 深度方向による腐食速度差がほとんどなく腐食速度(両面)は海水中 0.1 mm/yr 以下, 海泥中 0.05 mm/yr 以下の腐食傾向(c)とする。腐食傾向(c)の鋼矢板構造物は 40 年経過しても海水中の肉厚減量は 4 mm 未滿で腐食による損傷はあまりない。腐食傾向(c)は表-5.3 に示す調査鋼矢板構造物で発生した。

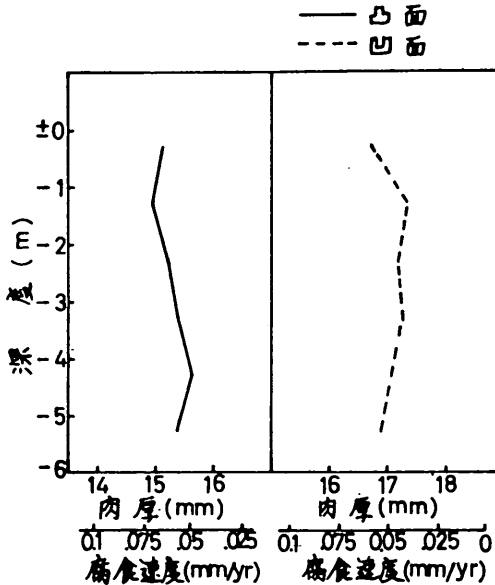


図-5.7 富山港 -7.5 m 岸壁における鋼矢板の腐食傾向(重量測定による, 34 年経過)

(4) 腐食傾向(d)

G 港岸壁の一部に干潮時に海泥面が露出するように非常に浅く一般の港湾の場合に比べて特殊な条件下で鋼矢板が使用された個所がある。付図-5.6 にこの個所の断面を示す。付図-5.6 に示す断面個所では建設後 13 年で +1.50 ~ +0.50 m の深度の凹面に腐食が集中して穴があき上部工が陥没した(凹面の穴より裏込め土砂が流出して空洞化していたところに車輻が通ったため上部工が陥没したことから凹面の集中腐食が発見されたので厳密には穴が発生するまでの期間は 13 年未滿となる)。13 年間で穴があいたとすると穴の個所の腐食速度(両面)は 10.5 mm/13 yr = 0.81 mm/yr となる。したがって 図-5.2 (d) のように残留水位下の凹面のみに腐食が集中しこの個所の腐食速度(両面)が 0.8 mm/yr 以上となる鋼矢板の腐食傾向を(d)とする。腐食傾向(d)が発生

したのは表-5.4 に示す 1 港のみである。

(5) 腐食傾向(e)

小樽港信香町物揚場では 40 年後に凸, 凹矢板 99 枚づつが残っていた。付図-5.7 に信香町物揚場の断面図を示す。信香町物揚場では M. L. W. L. 直下の凸面と凹面に腐食が集中し穴の発生率は凸面で 100%, 凹面で 86% であった。穴の大きさは断面方向は凸面, 凹面とも幅一杯であり深度方向は M. L. W. L. から 20 ~ 70 cm 間であった(なお一部には穴から裏込めの雑割石が海側に落下していたため穴の下端深度が測定できない個所もあった)。この他信香町物揚場では凸面からタイロッドが張られておりタイロッドを固定するための溝形鋼が海側 L. W. L. 付近に水平に取付けられていた。調査時点では溝形鋼のエッジ部は腐食のため大半なくなっていた。M. L. W. L. 直下の穴が何時頃あいたのかははっきりしないが例えば 20, 30, 40 年であいたとすると穴の個所の腐食速度(両面)は 0.40, 0.27, 0.20 mm/yr となる。図-5.2 の(e)のように M. L. W. L. 直下付近の凸面と凹面に腐食が集中し凸, 凹面に穴があいているような鋼矢板の腐食傾向を(e)とする。腐食傾向(e)は表-5.5 に示す調査港で発生しており, 凸, 凹面の M. L. W. L. 直下付近の集中腐食速度(両面)は 0.5 ~ 1.0 mm/yr でさらに深度が下がると 0.1 mm/yr 以下となる。また側面では凸, 凹面のような集中腐食が発生せず M. L. W. L. 下の腐食速度(両面)は 0.1 mm/yr 以下である。腐食傾向(e)が発生すると腐食傾向(a)が発生した場合のように II 形相当品では 10 数年未滿で集中腐食個所に穴があき, 穴から裏込め土砂の流出さらには上部工の陥没を生ずる。

(6) 木材接触による影響

今治港浅川荷揚場(40 年経過)は付図-5.8 に示すように干潮時には海泥面が露出するが, さらに貯木場であるため干満に応じて鋼矢板凸面に木材が接触する。木材の接触が鋼矢板凸面の腐食に影響するのは写真-5.6 に示すように海泥面上数 10 cm の範囲(はば +2 ~ +1.5 m 間で干潮時に鋼矢板面が湿っている範囲)に限られ, +2 m 以上の鋼矢板凸面は平滑で腐食による損傷はほとんど見られない。非破壊調査結果を 図-5.8 によれば +2.0 ~ +1.5 m 間の海泥面に近い凸面でも腐食速度(両面)は 0.1 mm/yr 程度であり, +2.0 m 上の凸面の腐食速度は 0.05 mm/yr 以下である。浅川荷揚場の調査結果から貯木場で木材が鋼材面に接触する場合鋼材腐食におよぼす木材の摩擦による影響はあま

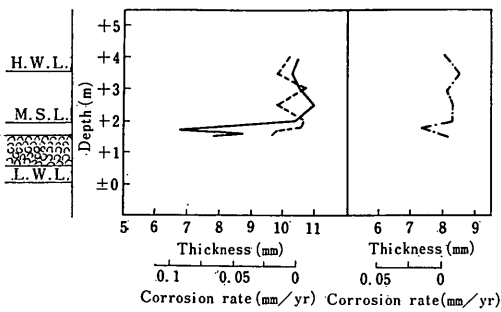


図-5.8 今治港浅川荷揚場における鋼矢板腐食傾向 (40年経過)

り著しくなく、接触個所の鋼材肉厚減量は40年間で4mm (=0.1mm/yr)程度にすぎないことがわかった。

5.2.2 H.W.L.上の鋼矢板の腐食傾向

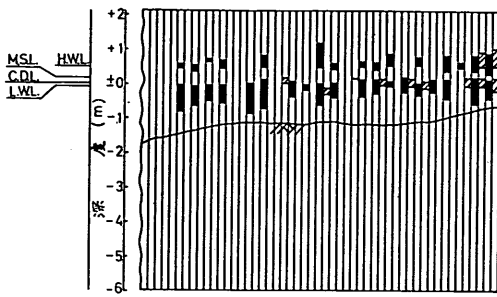
調査鋼矢板構造物のうち海側鋼矢板面がむき出しのままのものまたは上部コンクリート下端がH.W.L.上で止まっているものについてH.W.L.上鋼矢板面を調査してみると、穴があいているケースと穴が全く見られないケースの2通りがあることがわかった。

(1) H.W.L.上鋼矢板面に穴が発生したケース

H.W.L.上鋼矢板面に穴が発生した構造物は表-5.11のとおりである。表-5.11に示す構造物の中にはH.W.L.下の鋼矢板の腐食傾向が(a), (b), (c), (e)のものがありH.W.L.上の穴の発生傾向とH.W.L.下の腐食傾向とは特に関係はない。H.W.L.上鋼矢板面の穴は全矢板の一部にあくケースがほとんどであるが、穴の発生率はまちまちで多いときで全体の10~20%、少ないときで1~2枚である。穴の発生が多い構造物は函館港万代町船溜前面、函館港万代町船溜、函館港浅野町岸壁、室蘭港中卯埠頭、留萌港南岸土留護岸、留萌港南岸地区護岸、小樽港信香町物揚場、秋田港南埠頭 -4.6m岸壁、秋田港北埠頭 -4.6m岸壁、東京港月島岸壁、片上港同和鉸業第2けい船岸などで反対に穴の発生率が少ないのは函館港西浜埠頭G岸壁、函館港万代町岸壁、大湊港下北埠頭、塩釜港中埠頭などである。H.W.L.上の穴の発生割合の例として留萌港南岸土留護岸の発生状況を図-5.9に、東京港月島岸壁の発生状況を図-5.10に示す。また写真-5.7~写真-5.9にH.W.L.上の腐食状況を示す。

表-5.11 H.W.L.上鋼矢板面に穴が発生した構造物

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板タイプ	初期肉厚 (mm)		延長 (m)	施工年	経過期間 (yr)	防食の有無	無防食期間 (yr)	H.W.L.下の腐食傾向
				平坦部	側面部						
函館港	西浜埠頭G岸壁	-3.6	ラルゼン I	7.8	7	200	S. 5	39	(塗装)	39	a
"	万代町船溜前面	-2	" III	14.2	8	160	S. 8	36	なし	36	a
"	万代町船溜	-2.1	" I II	7.8 10.5	7 8	474	S. 7	37	"	37	a
"	万代町岸壁	-3 ~-3.5	" III YSP I	14.2 8	8 6	225 91	S. 5 S. 6	39 38	"	39 38	a
"	浅野町岸壁	-2.5 ~-4.3	" I	8	6	91	S. 6	38	"	38	a
室蘭港	中卯埠頭	-2.4	TR II	10 9	6	73	S.11	33	"	33	a
留萌港	南岸土留護岸	-2.0	" I	7.5	6	17	S. 2	45	"	45	a
"	南岸地区護岸 (旧矢板)	-2.0	" I	7.5	6		S. 5	42	"	42	a
小樽港	信香町物揚場	-2.4	ラルゼン I	8	7	40.6	S. 7	40	"	40	e
大湊港	下北埠頭	-5.5	" 30	10.5	10		S. 3	40	"	40	c
秋田港	南埠頭 -4.6m岸壁	-4.6	" II	10.2	8.7	122	S. 9	39	"	39	b
"	北 " "	-4.6	" II	"	"	"	S.11	37	"	37	b
塩釜港	中埠頭	-4.6	" III	14.2	9.2	192	S. 6	39	"	39	b
東京港	月島岸壁	-1.8	YSP III	13.0		250		>20	"	>20	a
片上港	同和鉸業第2けい船岸	-3.6	TR II	10 9	6	254	S. 5	42	"	42	b



(黒：凸面の穴，斜線：凹面の穴)
 図-5.9 留萌港南岸護岸の鋼矢板腐食状況
 (ラルゼン型)

H.W.L. 上の穴は鋼矢板凸面に多く発生するように見受けられるが必ずしも凸面のみではなく凹面にも発生する(図-5.9, 図-5.10 参照)。また穴の形状寸法はまちまちで鋼矢板平坦面一杯のもの(函館港万代町船溜前面, 室蘭港中卯埠頭, 小樽港信香町物揚場など), 平坦面と側面の境界付近に穴が見られるもの(大湊港下北埠頭), 肉厚が薄くなり小さな穴が散在しているもの(函館港西浜埠頭G岸壁, 秋田港南埠頭 -4.6m 岸壁など)などがある。H.W.L. 上の鋼矢板面がむき出しの鋼矢板構造物では H.W.L. 上の腐食傾向が(a)または(e)で H.W.L.

上の腐食傾向が穴の発生するケースの場合, 鋼矢板面には H.W.L. 直上部と M.L.W.L. 直下部の2深度に穴があくことになる(函館港万代町船溜前面, 留萌港南岸土留護岸, 東京港月島岸壁など)。なお H.W.L. 下の腐食傾向が(d)の場合には H.W.L. 直上部と残留水位直下部に穴が発生することになる。

H.W.L. 上の穴の個所の腐食速度ははっきり算出できないがⅡ形相当品(カタログ厚 10.5 mm)が仮に 20, 30, 40 年で穴があいたとすると腐食速度(両面)は 0.53, 0.35, 0.26 mm/yr となる。いっぽう H.W.L. 上で穴があいていない個所の腐食速度(両面)は 0.1 mm/yr 程度と小さい。調査例を 図-5.11, 図-5.12 に示す。

(2) H.W.L. 上鋼矢板面に穴が発生しなかったケース

H.W.L. 上鋼矢板面に穴が発生しなかった鋼矢板構造物は表-5.12 のとおりである。表-5.12 に示す鋼矢板構造物の H.W.L. 下の腐食傾向は(a), (b), (c), その他(木材接触)が含まれており, H.W.L. 上鋼矢板の腐食傾向と H.W.L. 下の鋼矢板の腐食傾向とは特に関係はない。写真-5.10 に H.W.L. 上で穴が発生しなかった鋼矢板構造物(30年以上経過)の H.W.L. 上の腐食状況を示す。

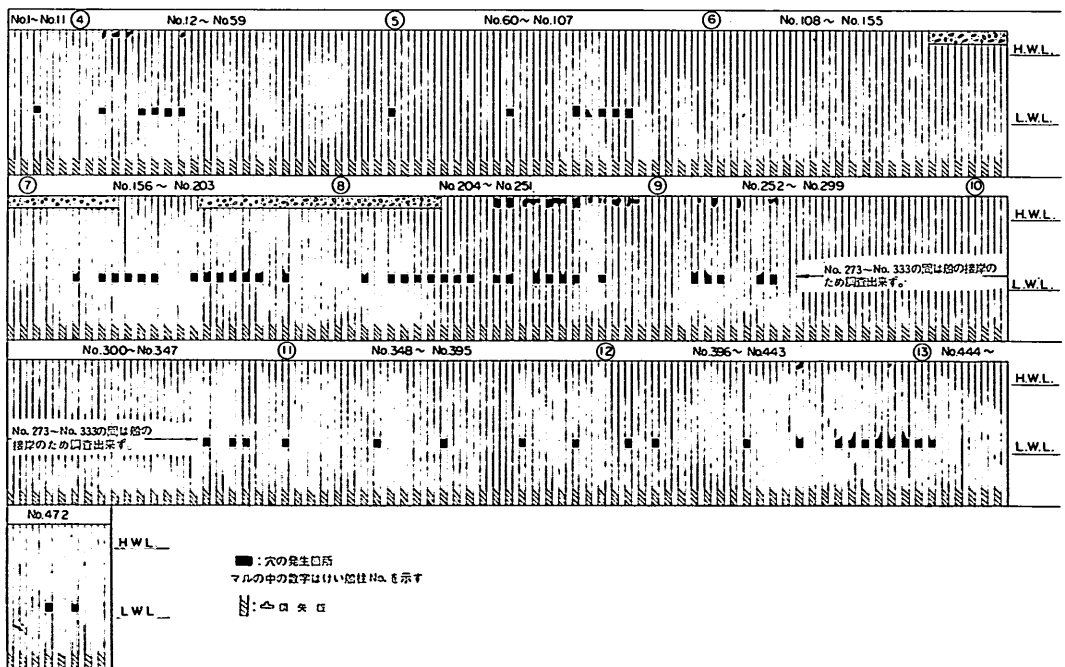


図-5.10 東京港月島岸壁鋼矢板における穴の発生状況

表-5.12 H. W. L. 上鋼矢板面に穴が発生しなかった構造物

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板 タイプ	初期肉厚 (mm)		延長 (m)	施工年	経過 期間 (yr)	防食の有 無	無防食 期間 (yr)	H.W.L. 下の腐食 傾向
				平坦部	側面部						
函館港	海岸町A岸壁	-6	ラルゼン III	14.2	8	184	S. 3	41 42	なし	41 42	b
恵曇港	2号岸壁	-2.7	TR II	10 9	6	166.3	S. 8	35	〃	35	a
広畑港	西浜護岸	-4	YSP III	13		200	S.14	28	〃	28	b
水島港	Aけい船岸	-3.5	ラルゼン IIIa	11	8	76	S.10	37	〃	37	b
今治港	浅川荷揚場	-1.5	〃 II	10.5	8	79.7	S. 6	40	〃	40	その他
橘港	Aけい船岸	-6	YSP III	13		65	S.14	32	〃	32	c
北淡港	-4.5m岸壁	-4.5	〃 II	10.5		136	S.10	34	(塗装)	34	a
津久見港	小野田第2工場 太平洋岸壁	-8.0	ラルゼン V	21 11	11 8	119.2	S. 9	38	なし	38	c

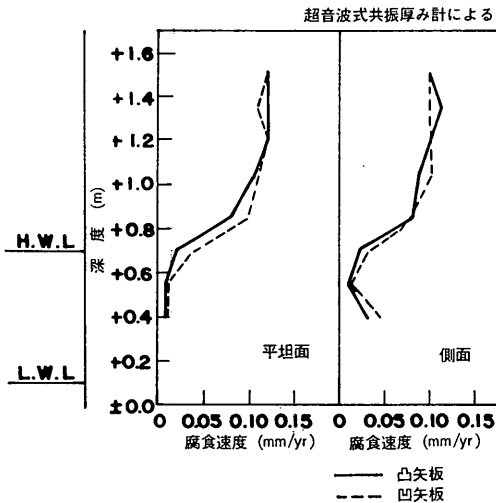


図-5.11 下北埠頭における海水面上の腐食速度

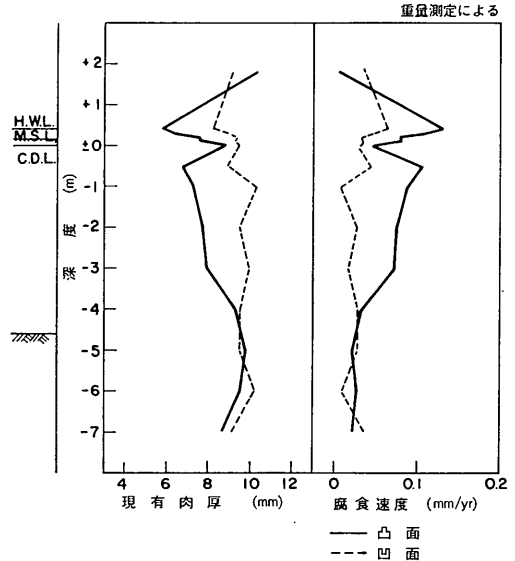


図-5.12 秋田港北埠頭 -4.6m 岸壁腐食傾向 (37年経過)

5.2.3 タイロッドの腐食傾向

タイロッドの腐食調査には鋼矢板構造物の上部工を取りこわす必要があるためタイロッドを調査する機会は制限される。表-5.1~表-5.6に示す鋼矢板構造物のうちタイロッドを調査した構造物は表-5.13のとおりである。古いタイロッドはジュート注)被覆または塗装され

ているケースが多くこれらの場合は30年以上経過してもタイロッドはほとんど腐食していなかった。

例えば富山港 -7.5m 岸壁ではタイロッドと鋼矢板の接続部分は上部コンクリートに包まれていたが土中部分のタイロッドはターンバックルも含めて全面ジュート被覆されていた。ジュート被覆の観察から(i)ジュートは2回巻きつけてあり(厚さ3mm程度)あまり劣化していなかった、(ii)ジュートに含浸させてあった瀝青物は34年後でも真黒で新鮮な感じがした、(iii)施工順序は最初に

注) 黄麻の繊維で織ったものでヘシアンクロスとも呼ばれる。JIS L-3405には織方について5種類の規定があるが、覆装用としては9号(8オンス物)および7号(10オンス物)が主に使用される。ジュートは水中で単独では腐り易いが、実際の管の塗装では加熱熔融した瀝青質塗料中を通過させて巻くので比較的耐久性がある(金属防蝕技術便覧, S.32年版, p.277)。

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

表-5.13 タイロッド調査構造物

港名	施設名	水深 (m)	鋼矢板		タイロッド			施工年	経過期間 (yr)
			タイプ	防食	外径 (mm)	長さ (m)	防食		
大湊港	下北埠頭	-5.5	ラルゼン 30	なし	38.1	11.3	(塗装)	S. 3	40
富山港	-7.5m 岸壁	-7.5	TR V	〃	55	13.7	ジュート被覆	S. 9	34
〃	-3.0m 物揚場	-3.0	YSP II	〃	30	10	なし	S. 33	11
伏木港	左岸3号岸壁	-5.0	クロックナIII	〃	50	15	ジュート被覆	S. 8	37
N 港	No. 1, 2, 4, 5	-2	ラルゼン I	〃	25.4		なし	S. 3	27
〃	No. 7	-2	〃 IIa	〃	25.4		〃	S. 11	19
北湊港	-4.5m 岸壁	-4.5	YSP II	〃	50	9.7	ジュート被覆	S. 10	34

鋼矢板との接続部分をコンクリートで包み次に土中部分のタイロッドをジュート被覆したなどのことがわかった。写真-5.11に回収したタイロッドの断面を示す。土中タイロッドの外径は付表-5.7に示すように上部コンクリートから1m離れた個所の平均は55.3mm、土中部分の全平均は55.6mmであった。また切取って成形したタイロッド片ではノギスで測定した外径は55.7mm重量測定より算出した外径は55.2mmであった。施工資料によればタイロッドの初期外径は55mmであるが、上部コンクリートの外径55.3mmを初期外径としても富山港-7.5m岸壁のタイロッド(土中)の腐食速度は0mm/yrとなる。北湊港(34年経過)でもタイロッドはジュート被覆されていたが付表-5.8に示すようにタイロッド(土中)の外径は49.7~49.8mmでほとんど初期外径(施工資料では50mm)に近い。

いっぽう大湊港下北埠頭-5.5m岸壁(40年経過)のタイロッドは塗装されていた。回収したタイロッド面には砂粒が付着しており発錆はほとんど見られなかったがさらに乾燥して砂粒を除いてみると砂粒の下に赤橙色の部分が散見された。切取ったタイロッド片を水洗して砂粒を除去するとタイロッド面には黒皮がまだ残っており、またターンバックルに接続するロッドのネジ山も鋭くほとんど初期のままであった。タイロッドを十勝沖地震(S.43年5月)の1ヶ月後に掘出したところ大半のタイロッドは錨定板にしっかり固定されていたが、一部には固定用金具が緩んだところがありさらには固定用金具(ナット、座金)がタイロッドよりはずれており単独に砂層中に埋設されているところがあった。この場合回収時にタイロッドに接触していた金具はほとんど発錆し

ていなかったが、タイロッドよりはずれて単独に埋設されていた金具は錆で砂を固めて大きな固まりとなっていた。このようにタイロッドとの接触の有無によって金具の腐食が異なる現象は海中構造物の腐食機構を示唆する一資料と思われる。

裸タイロッドの調査例として富山港-3.0m物揚場におけるタイロッドの外径測定結果を付表-5.9に示す。-3.0m物揚場では土中のタイロッド部分の外径は31.4~31.9mmでコンクリート中の外径31.9mmを初期外径とすると裸タイロッドの腐食量は小さい。N港でも裸タイロッドが使用されていたがここでは+3.780mと+1.100mの2段に取付けられていた。N港でのタイロッドの腐食速度は上段0.03~0.08mm/yr、下段0.05~0.18mm/yrであったが、ここでは土壤中に酸の浸透があったことが指摘されている。

5.3 鋼管杭構造物の腐食の実態

5.3.1 H.W.L. 下の鋼管杭の腐食傾向

鋼管杭構造物のH.W.L.下の鋼管杭の腐食傾向は(a), (b), (c)の3通りに大別できる。

(1) 鋼管杭腐食傾向(a)

東京港豊海水産埠頭ドルフィン、棧橋が10年未満で傾斜して使用不能となった。付図-5.9にドルフィンの断面図を示す。昭和48年~昭和49年に行なわれた豊海水産埠頭改造の際に鋼管杭の破壊調査を実施した。図-5.13、図-5.14に回収鋼管杭の腐食傾向を示す。図-5.13は上部コンクリートの下端がM.S.L.付近まで、図-5.14は上部コンクリートがH.W.L.上までのケースであるが、H.W.L.下の腐食傾向は類似している。すなわちどちらのケースもM.L.W.L.直下部では腐食が著し

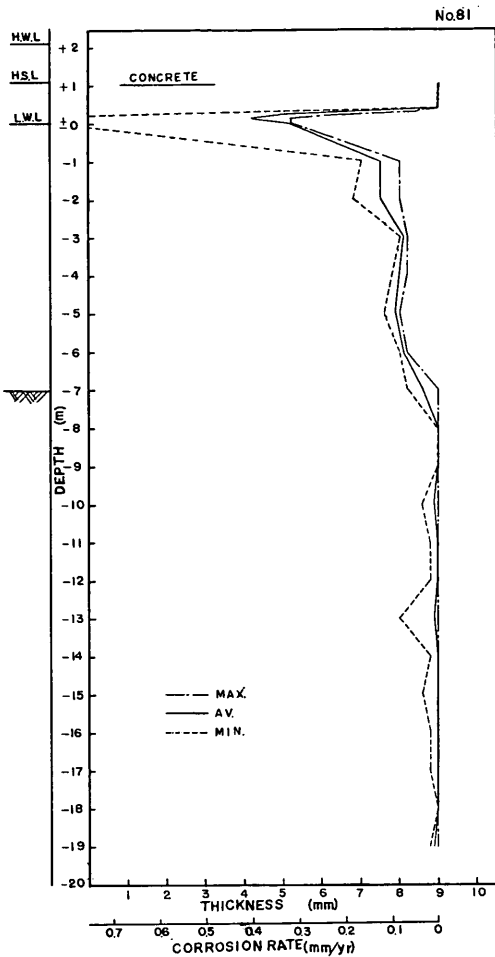


図-5.13 東京港豊海水産埠頭における鋼管杭の腐食傾向 (1)

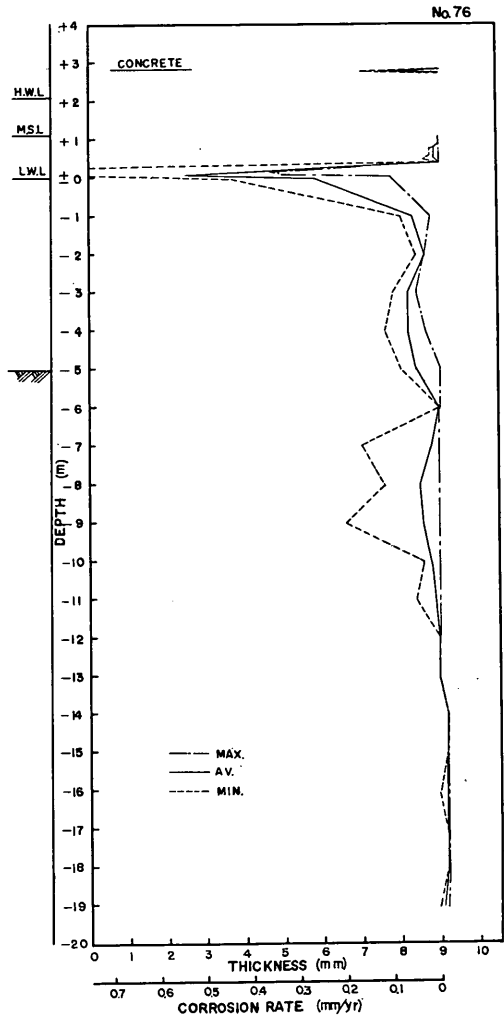


図-5.14 東京港豊海水産埠頭における鋼管杭の腐食傾向 (2)

く穴があいており平均腐食速度(両面)は0.3~0.5 mm/yr(穴の個所の腐食速度は0.8 mm/yr以上)であるがさらに深度が下がるにつれて腐食速度は漸減し海水中は0.1 mm/yr程度である。写真-5.12にM.L.W.L直下付近の穴の発生状況を示す。いっぽう海泥中では腐食速度は0.01 mm/yr以下であるが孔食が散見されたところがある。この孔食部分の腐食速度は0.1~0.2 mm/yrであった。なお豊海水産埠頭の鋼管杭はタールエポキシ系の塗料が塗装されており、海水中ではほとんど剥げていたが海泥中ではまだ残っているところが多かった。海泥中で孔食が散見されたのは主として塗膜が部分的に剝離したためではないかと予想される。図-5.13、図-5.14に示す豊海水産埠頭の鋼管杭のような腐食傾向を(a)と

する。鋼管杭の腐食傾向(a)は鋼矢板の腐食傾向(a)に類似している。

(2) 腐食傾向(b)

M.L.W.L.直下部の腐食速度が0.2 mm/yr前後と腐食傾向(a),(c)の中間のケースを腐食傾向(b)とする。このような腐食傾向は東京港豊海水産埠頭の一部鋼管杭に見られた。鋼管杭の腐食傾向(b)は鋼矢板の腐食傾向(b)に類似している。

(3) 腐食傾向(c)

下関港ドルフィン(8.5年経過)の鋼管杭では付表-5.10に示すように腐食速度は深度方向によって大差な

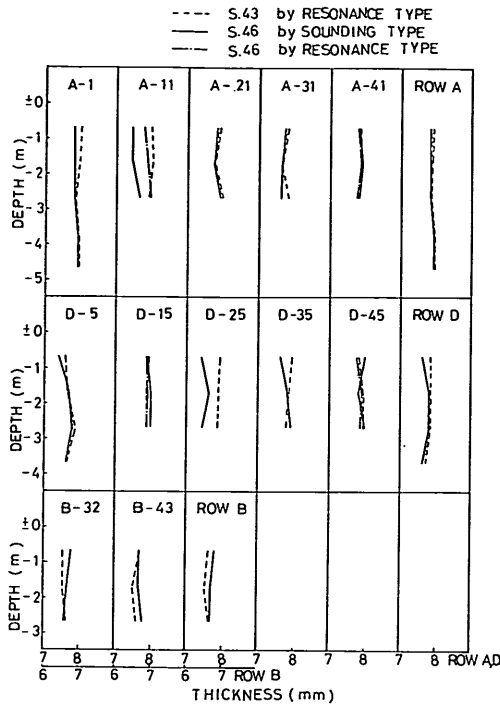


図-5.15 須磨船積棧橋基礎鋼管杭の測定肉厚

く潮位間および海中とも 0.05 mm/yr 以下であった。なお下関港ドルフィンの断面図を付図-5.10 に示す。

須磨船積棧橋は昭和 38 年には土砂積出し用として建設され 5 年後と 8 年後に腐食調査が行なわれた。図-5.15 に須磨船積棧橋の鋼管杭の肉厚測定結果を示す。図-5.15 によれば調査鋼管杭の肉厚減量は 0.1~0.2 mm 程度のところが多いが中には 0.3~0.4 mm のところもある。8 年後の腐食速度は前者で 0.01~0.02 mm/yr、後者で 0.04~0.05 mm/yr となる。また鋼管杭を観察するため潜水夫による肉眼観察または水中撮影を行なったが鋼管杭面には腐食によるひどい損傷箇所はなく、付着物を除くと平滑面が多く部分的には深さ、直径とも 1 mm 未満の凹みが点在している状態であった。

この調査例のように鋼管杭の腐食速度は深度方向、断面方向によって大差なく値も小さい。このような鋼管杭の腐食傾向を(c)とする。鋼管杭の腐食傾向(c)は鋼矢板の腐食傾向(c)に類似しており H.W.L. 下の腐食速度は 0.1 mm/yr 以下である。

5.3.2 H.W.L. の鋼管杭の腐食傾向

表-5.7、表-5.8 に示す調査鋼管杭構造物のうち上部コンクリート被覆が H.W.L. 上で止まっていた例に東京

港豊海水産埠頭ドルフィン、棧橋がある。すなわち東京港では H.W.L. が +2.108 m であるがドルフィンでは上部コンクリート下端が +2.88 m と +1.0 m の深度、棧橋では +3.05 m と +2.60 m の 2 深度のケースがある。したがって H.W.L. 上の鋼管杭の腐食傾向としてドルフィン、棧橋でコンクリート下端 H.W.L. が上の鋼管杭についての調査結果を示す。

豊海水産埠頭の鋼管杭では +1.9 m 付近の深度まではフジボが付着しており +1.9~+0.5 m 間の腐食速度は 0.06~0.09 mm/yr であった。+1.9 m 以上では海洋生物の付着はなく腐食生成物で覆われている。+1.9~+2.3 m 間の平均腐食速度(両面)は 0.09 mm/yr 程度であり直径 2~3 mm、深さ 1 mm 位の孔食が散見された。+2.3~+2.7 m は H.W.L. 直上部(飛沫帯)で錆層が数 mm と厚く腐食速度も 0.2~0.4 mm/yr となり、初期肉厚が 6 mm の棧橋鋼管杭の中には写真-5.3 に示すように小さな穴が散見され屈屈に似た現象が見られた箇所があった。穴の個所の腐食速度は 0.2 mm/yr (=6mm/12 yr)^(注) 以上となる。

5.4 閘・水門施設の腐食の実態

閘・水門施設の例として表-5.9 に示す尼崎港第一閘門と蓬川水門の腐食調査を行なった。付図-5.11 に閘門前扉断面図を示す。第一閘門、蓬川水門ともセクターゲート式で昭和 28 年に竣工しており門扉、閘室、取付護岸、誘導堤、ポンプ場スクリーンなどより成る。門扉は付図-5.11 に示すようにスキンプレート、各種補剛材(垂直材、斜材、水平材)、ジェットパイプなどから成る複雑な構造をしている。なおジェットパイプは門扉の開閉直前に海水を噴射して門扉とコンクリート床面との間の堆積物を除去する役目を持ち、ポンプ場は堤内水位が管理水位より上昇したときに堤内の海水を堤外に排水する働きをする。

5.4.1 門扉スキンプレートの腐食傾向

門扉スキンプレートの測定結果を図-5.16 に示す。図-5.16 によれば第一閘門の場合には +2 m より深度が下がるにつれて腐食速度は漸増して -1 m 付近で最大となり、-1 m 付近の腐食速度(片面)は 0.06~0.08 mm/yr であった。-1 m よりさらに深度が下がるにつれて腐食速度は漸減し -3 m 以下では 0.05 mm/yr またはこれ以下と小さい。いっぽう蓬川水門では深度方向による腐食速度の変化はあまりなく 0.04 mm/yr 以下である。なお閘・水門の場合とも +2 m 以上は塗装が十分残注) 調査が棧橋建設後 12 年してから行なわれたため。

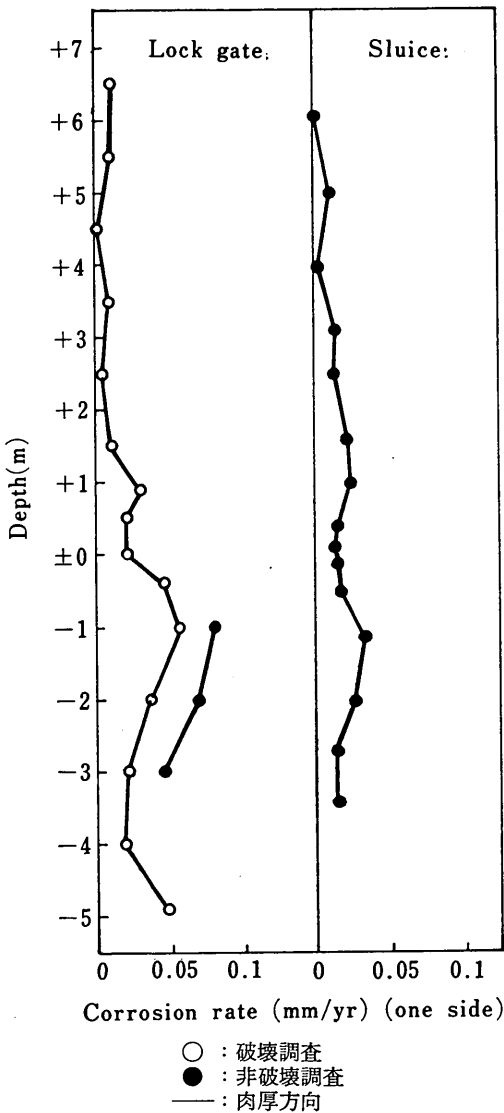


図-5.16 門扉スキンプレートの腐食傾向

っているので+2m以上の腐食速度は肉厚測定前に塗装を除去するためグラインダで研磨したときの肉厚減量とみなすと、図-5.16に示す+2m以上のスキンプレートの腐食速度はさらに0.01 mm/yr位小さくなる。ただし図-5.16に示す値はスキンプレート中央部についての測定値である。いっぽうスキンプレートの左右端部のエッジ部では-1m付近で腐食が著しい。同様スキンプレート下端のエッジ部でも門扉開閉時の底部堆積物による摩耗のため尖鋭化している。写真-5.14に左右端部の腐食状況を、写真-5.15に下端部の腐食状況を示す。

5.4.2 門扉補剛材、補助材の腐食傾向

図-5.17に前扉垂直材の測定結果を、図-5.18と図-5.19に前扉斜材の測定結果を、図-5.20に前扉水平材の測定結果を示す。垂直材は150×150×15 mmの山形鋼2枚が背中合せに+5.4~-2.9mの深度に使用されている。垂直材の肉厚方向の腐食速度は+1m以上はほとんど0 mm/yrで+1~±0 mで多少増えて0.025 mm/yr位になるが、深度がさらに下がるにつれて漸減し-1m以下では0.01 mm/yrとなる。これに対して幅方向の腐食速度(両面)は+2m以上では無視し得る程度であるが+1~+0.5 mにかけて急増して0.15~0.20 mm/yr(最大値は0.284 mm/yr)となり、+0.5~±0.0 mにかけて急減して±0~-3 mでは0.02~0.05 mm/yrとなる。

斜材1は75×75×9 mmの山形鋼2枚と125×175×10 mmの山形鋼2枚が背中合せに束ねられて+5.4~-0.68 m間に傾斜して取付けられている。斜材1も垂直材と同じく+1~±0 m間で幅が急減しており腐食速度

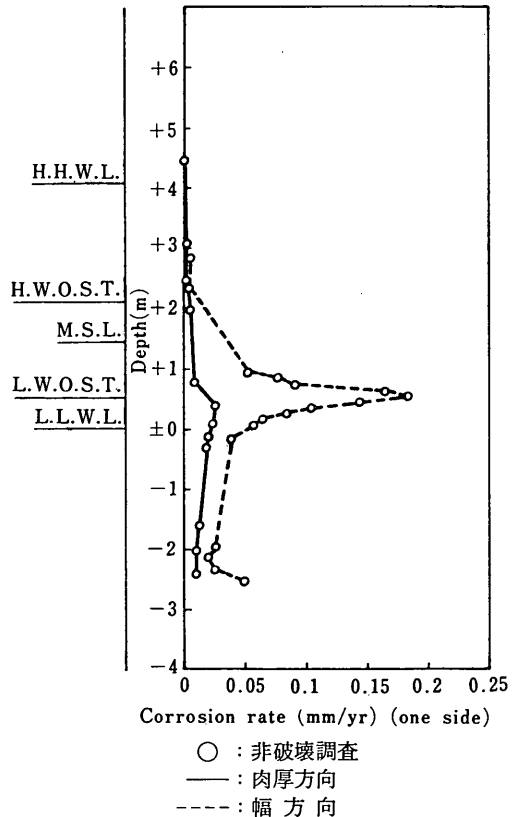


図-5.17 門扉垂直材の腐食傾向

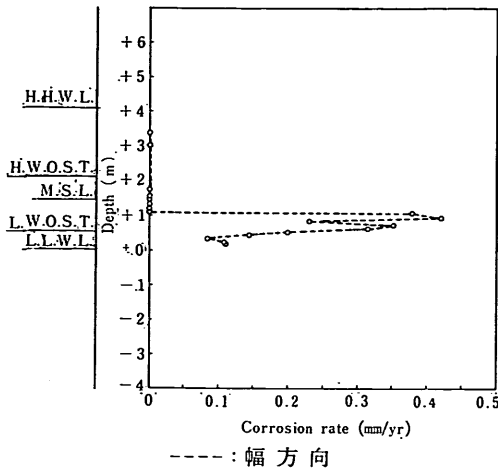


図-5.18 門扉斜材1の腐食傾向(非破壊調査)

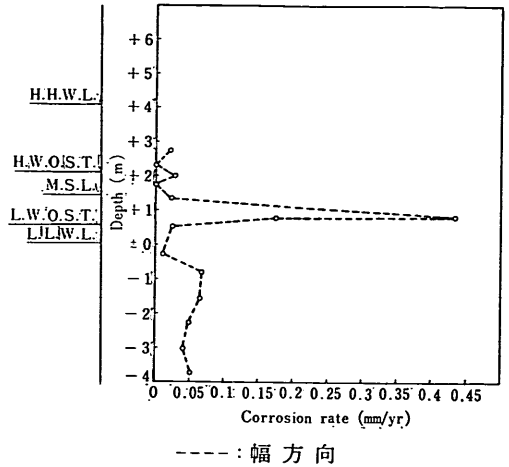
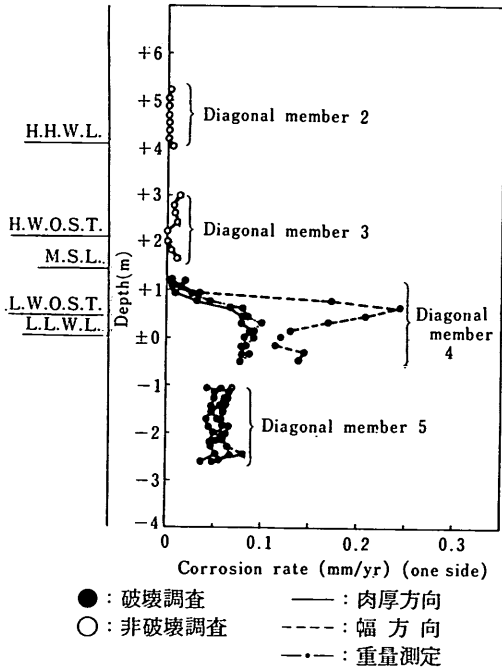


図-5.20 門扉水平材2の腐食傾向(非破壊調査)



● : 破壊調査 — : 肉厚方向
○ : 非破壊調査 - - - : 幅方向
 - · - : 重量測定

図-5.19 門扉斜材2～5の腐食傾向

は 0.42 mm/yr (最大 0.43 mm/yr) にも達する。いっぽう斜材 2, 3 は 75×75×9 mm の山形鋼が, 斜材 4, 5 は 75×75×12 mm の山形鋼が 2 本背中合せの状態で付図-5.11 に示すようにスキンプレートと垂直材間にそれぞれ取り付けられている。斜材の取り付け深度は +5.4～+3.7 m 間で幅の減少はほとんどない。

斜材 3 の取り付け深度は +3.4～+1.5 m 間で幅の腐食

速度は小さく 0～0.01 mm/yr である。いっぽう斜材 4 は +1.3～-0.6 m 間に取付けられており +1 m 以上では腐食は少なく幅減少速度でも 0.02 mm/yr 以下であるが, +1 m 以下では腐食速度は増加する。+1～±0 m 間では肉厚方向の腐食速度は 0.08～0.1 mm/yr 程度であるが幅方向の腐食速度は +0.65 m 付近で 0.25 mm/yr (最大 0.675 mm/yr) にもなり ±0 m 以下では 0.12～0.14 mm/yr となる。斜材 5 は -0.9～-2.9 m 間に取付けられており腐食速度は肉厚方向, 幅方向とも 0.05 mm/yr 程度で深度による差は見られない。

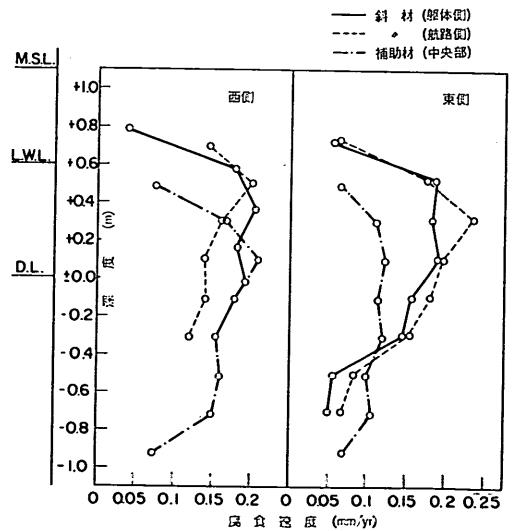


図-5.21 尼崎港第一閘門扉, 斜材, 補助材の腐食傾向(重量測定)

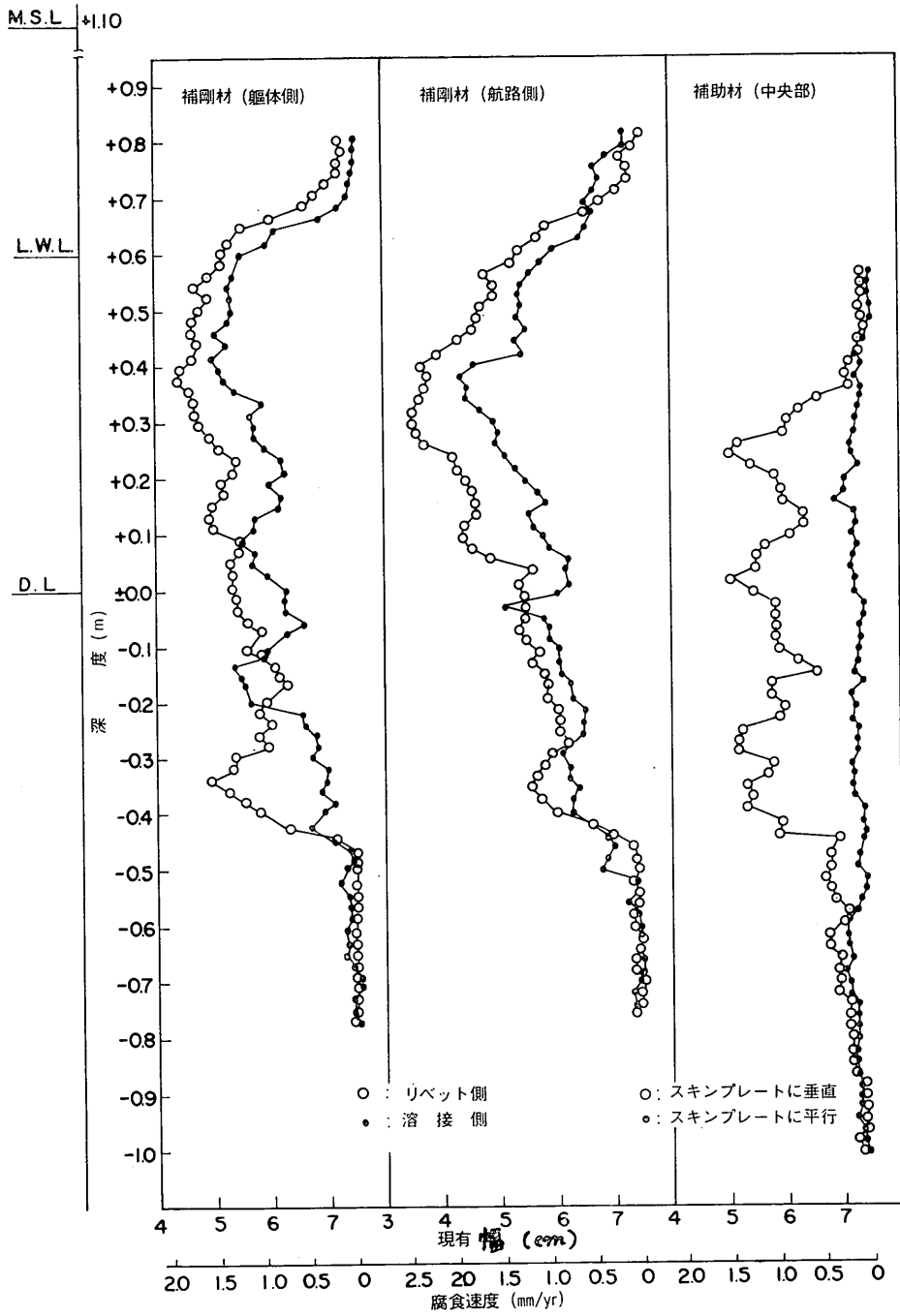


図-5.22 尼崎第一閘門後扉(東側)補剛材, 補助材の腐食傾向(幅方向)

水平材 2 は 250×100×12 mm または 200×90×8 mm の溝形に構成したもので +2.8～-3.7 m 間に取付けてある。水平材 2 の腐食傾向は垂直材や斜材と同じく幅減少量は +1～±0 m 間で急増して +0.9 m では腐食速度は 0.43 mm/yr (最大 1.2 mm/yr) にもなるが、+1 m 以上では 0～0.03 mm/yr、+0.5 m 以下では 0.01～0.07 mm/yr である。したがって、蓬川水門の門扉部材の腐食傾向は深度方向では +1～±0 m 間、断面方向では山形鋼、溝形鋼のエッジ部分に腐食が集中し最大腐食速度が 1 mm/yr (片面) を越す場合がある。写真-5.16 に溝形鋼のエッジ部分に腐食が集中した現象を示す。写真-5.16 からわかるように幅の減少は片方だけに集中する傾向がある。しかし上記の幅方向の腐食速度は片面についての値で (初期幅-現有幅)/期間×2 から算出している。したがって写真-5.16 のような場合の幅の減少速度は幅方向の腐食速度 (片面) の 2 倍に相当する。いっぽう尼崎港では地盤が沈下しており調査時点での集中腐食個所の深度は付図-5.12 に示すように M.L.W.L. 直下の数 10 cm の範囲となり腐食の集中はこの深度範囲の突出部で著しい。

第一閘門後扉からも斜材 (+2.05～-0.80 m 間に取付け) および垂直補助材 (+0.60～-1.05 m 間に取付け) を切取って重量測定および幅測定を行なった。重量測定結果を図-5.21 に、幅測定結果を図-5.22 に示す。図-5.21 によれば重量減量より算出した斜材の平均腐食速度は +0.5～+0.4 m から急増して 0.15～0.20 mm/yr となりさらに深度が深くなるにつれて漸減する傾向が見られるが、垂直補助材の平均腐食速度は +0.3～-0.8 m にかけて 0.1～0.2 mm/yr と増えている。これに対して図-5.22 に示す幅方向の腐食速度は重量減量から求めた平均腐食速度より約 10 倍大きい。なお斜材では +0.6 m 付近から補助材では +0.3 m 付近からと幅方向の腐食速度が急増する深度にずれが見られるが、これは補助材の +0.6～+0.3 m 間には大きなプレートに接続されていたのでプレートが一種の犠牲鉄板の役目をしたためと思われる。

5.4.3 ジェットパイプの腐食傾向

ジェットパイプには吸水管と排水管がある。吸水管は長さが 1.5 m 足らずで海面に没する状態でコンクリート側壁に取付けられていたが発錆はほとんど見られなかった。これに対して排水管は吸水管より長くまた部分的に腐食の激しい個所があった。付図-5.13 に排水管の取付け位置およびコア採取個所を示す。蓬川水門では穴

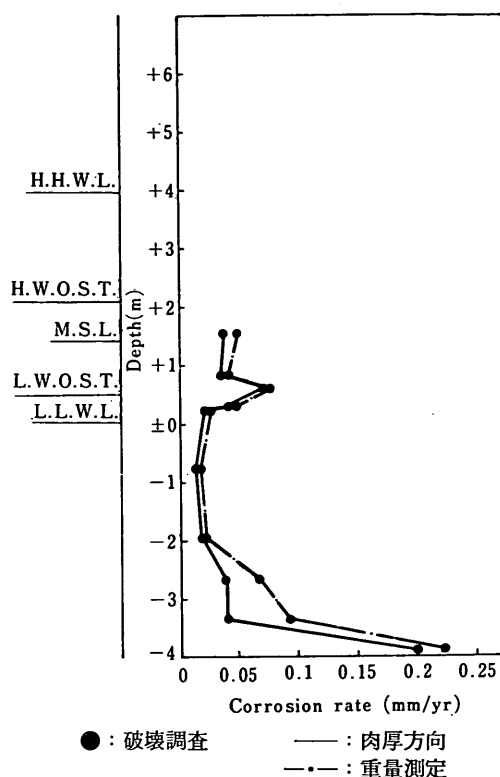


図-5.23 尼崎港におけるジェットパイプの腐食傾向

が +0.8～+0.6 m と -3.9 m のところにあいておりすでに使用できない状態であった。図-5.23 に水門におけるジェットパイプ (排水管) の測定結果を示す。図-5.23 によれば +0.62 m では穴があいていたにもかかわらず穴の個所の腐食速度は 0.1 mm/yr 以下にすぎない。これは穴があくまでの期間を試験材を回収するまでの 16.25 年として腐食速度を算出したためで、実際には穴はもっと早くあいたものと考えられる。例えば第一閘門では建設後 4 年で +1.0 m と -4.0 m 付近に穴があいた。表-5.14 に第一閘門におけるジェットパイプの測定結果を示す。閘門の場合ジェットパイプ外面の塗装がまだ十分に残っている +2.30 m の深度の腐食量を全部内面からの腐食量と考えて内外面の腐食量を比較してみると表-5.14 に示すように -0.9 m と -2.9 m 以外では外面からの腐食量が内面からの腐食量より大きかった。このことを裏付けるものとして写真-5.17～写真-5.19 の現象がある。すなわち写真-5.17 は漂流物が附着した個所に穴があき、写真-5.18 は堆積泥に埋設した個所 (ジェットパイプの下半分) に穴があきこの個所を輪切

表-5.14 ジェットパイプの腐食量

試料 No.	水深 (m)	重量減量 (g)	腐食速度 (mm/yr)	腐食期間 (yr)	外面腐食速度 内面腐食速度
1	+2.30	87.32	0.069	4	1.00
2	+0.10	347.79	0.280	4	3.06
3	-0.91	180.24	0.140	4	1.03
4	-1.91	285.71	0.224	4	2.25
5	-2.91	150.03	0.122	4	0.77
6	-3.91	472.23	0.364	4	4.28
7	-4.40	512.51	0.399	4	4.78
8	-4.40	437.41	0.373	4	4.41
9	-4.40	299.07	0.252	4	2.65
10	-4.40	318.45	0.269	4	2.90

りにすると写真-5.19のようになった。

5.4.4 スクリーンの腐食傾向

スクリーンは浮遊物がポンプへ吸入されるのを防ぐ役目のものでポンプに近い方を二次スクリーンという。二次スクリーンは付図-5.14に示すようにプレート (50×9 mm), 縦枠 (125×65×6×8 mm), 横枠 (125×65×6×8 mm と 75×40×5 mm), 丸鋼棒 (φ 25 mm), ブラケット, 斜材 (50×9 mm, 75×9 mm) より成る。

図-5.24にスクリーンプレートの測定結果を示す。スクリーンプレートは50×9 mmの板材で+2.8~-2.9 mの深度に取付けられており+1 m以上の腐食速度は小さく0.02~0.03 mm/yrであるが,+1~±0 mで腐食速度は増大して肉厚方向では0.09 mm/yr(最大0.39 mm/yr), 幅方向で0.32 mm/yr(最大0.5 mm/yr)となる。さらに±0 m以下は肉厚方向では0.07~0.09 mm/yr(最大0.27 mm/yr), 幅方向では0.1~0.15 mm/yrとなるが,-2.9 mでは0.18 mm/yr(最大1.0 mm/yr)と大きくなっている。このようにスクリーンプレートの腐食速度は肉厚方向より幅方向の方が大きく幅方向は+0.26 mで最大となり門扉補剛材の幅方向の腐食傾向に類似しているようであるが±0 m以下では補剛材の場合より大きい。

図-5.25に縦枠の測定結果を示す。縦枠は125×65×6×8 mmの薄形鋼で+2.76~-2.93 mの深度にかけて付図-5.14に示すようにスクリーンプレート30枚を両脇から固定している。縦枠の腐食傾向はスクリーンプレートの腐食傾向に類似しているが幅方向の腐食速度はさらに増大して+0.26 mで1.75 mm/yr(最大4.9 mm/yr)

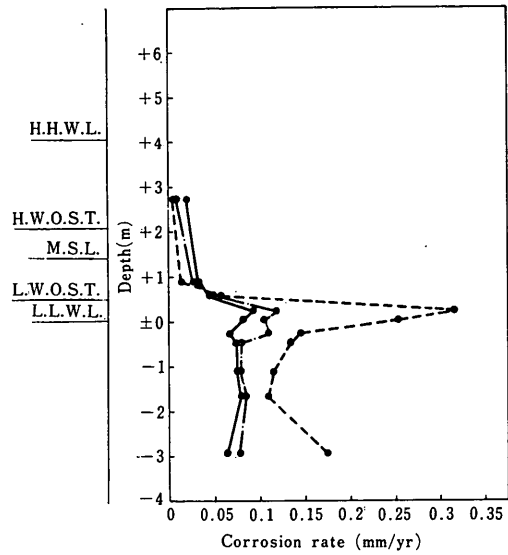


図-5.24 尼崎港におけるスクリーンプレートの腐食傾向

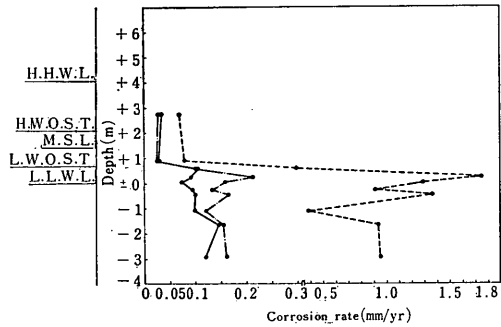


図-5.25 尼崎港におけるスクリーン縦枠の腐食傾向

にも達し, ±0~-2.9 mにかけても0.4~1.36 mm/yr(最大1.22~4.18 mm/yr)と大きい。縦枠の幅の腐食状況を写真-5.20に示す。図-5.25のように縦枠の幅の減少は門扉補剛材の場合と同様に片側からのみ進行する傾向なので腐食速度(片面)の倍の値が幅の一方に集中することになる。例えば最大腐食速度(片面)が4 mm/yrの場合, 2×4 mm/yr=8 mm/yrが両面併せての腐食速度となるが8 mm/yr×6 yr=48 mmの幅の減少が片面に集中する。このような腐食傾向から比較的短期間で破断したスクリーン(写真-5.23参照)の現象が理解で

きる。

5.5 鋼構造物にみられる集中腐食の現象

一般に外観上の特長あるいは腐食原因による腐食の分類として、ガルバニ腐食 (galvanic corrosion), キャビテーションエロージョン (cavitation-erosion), コロージョンエロージョン (corrosion-erosion), 腐食割れ (cracking), すき間腐食 (crevice corrosion), デポジットアタック (deposit attack), 脱成分腐食 (dealloying), 全面腐食 (uniform attack), 粒界腐食 (intergranular corrosion), 孔食 (pitting), 選択腐食 (selective corrosion) などがある^{注1)}。いっぽう 5.2~5.4 に示すように港湾鋼構造物では H. W. L. 下で腐食が集中して例えば鋼矢板構造物では 20×40 cm というような大きな穴が比較的短時間で発生する (写真-5.5 参照)。このような腐食現象を説明する用語としては上記の孔食^{注2)} よりも集中腐食の方が適すると考え本報では便宜上集中腐食ということにした。

鋼矢板構造物では H. W. L. 下の集中腐食の発生状況によって鋼矢板の腐食傾向は (a)~(e) の 5 通りに、鋼管杭構造物では鋼管杭の腐食傾向 (a)~(c) の 3 通りに分類できた。集中腐食は鋼構造物の特定個所のみ発生するため鋼構造物に与える損傷は大きい。

例えば鋼矢板構造物では腐食傾向 (a), (d), (e) の場合には鋼矢板面に腐食が集中して比較的短期間 (ラルゼン II 形相当品 (初期肉厚 10.5 mm) では 10 数年未満) で穴があき、穴から裏込め材が流出して上部工の沈下、陥没が起こる。穴は鋼矢板凸面の M. L. W. L. 直下付近 (腐食傾向 (a)), 凹面の残留水位直下付近 (腐食傾向 (d)), 凸面と凹面の M. L. W. L. 直下付近 (腐食傾向 (e)) にそれぞれ発生する。穴の大きさは幅 20 cm (凸面または凹面の幅)×長さ 30~40 cm 程度である。写真-5.21 に裏込め材の流出による上部工 (未舗装) の沈下状況を示す。穴から裏込め土砂の流出がひどくて上部工の下が空洞化したとき車輻や越波などにより上部工 (コンクリート舗装) が陥没する。写真-5.22 に越波による上部工の陥没状況を示す。

開・水門のジェットパイプでは写真-5.17 に示すように腐食が集中した個所に穴があいて数年未満でジェット

パイプの役目を果さなくなっていた。開・水門扉補剛材、補剛材として使用した山形鋼では M. L. W. L. 直下のエッジ部に腐食が集中して危険なため (腐食速度が 2 mm/yr を越すケースもある) 10 数年未満で取替えられた。またポンプ場のスクリーンで縦枠 (溝形鋼) の M. L. W. L. 直下のエッジ部に集中腐食が発生して写真-5.23 に示すように数年未満で破断した例がある。

鋼管杭構造物では M. L. W. L. 直下に集中腐食が発生した場合 (鋼管杭腐食傾向 (a)) には 9 mm の鋼管杭が 10 年未満で M. L. W. L. 直下で輪切り状態となった例がある (写真-5.12 参照)。

6. 鋼構造物の腐食傾向の発生機構についての考察

6.1 腐食傾向に影響する要因

6.1.1 腐食傾向の発生状況からみた要因

鋼構造物の腐食傾向 (図-5.2 参照) の発生因として水質、流速、船または木材などの接触、海洋付着物、上部コンクリート被覆、方向性、バクテリア、腐食生成物、応力、水深による溶存酸素量差、迷走電流、材質、温度、光などが一般に指摘される。したがって腐食傾向の発生因を検討するに際してまずこれらの諸因と現地調査結果との関係を考察してみる。ただし腐食傾向 (d) は干潮時に海面が露出する特殊な環境条件下で発生したのでここでの考察からは除外しておく。表-6.1 に 83 例の調査鋼矢板構造物の条件と腐食傾向の発生状況を示す。なお表-6.1 の数字は各条件に該当する腐食傾向の発生条件数である。

(1) 水深

表-6.1 では水深を -3 m 未満, -3~-5 m, -5 m 以上の 3 分類にした。水深が -5 m より深いときには集中腐食 (腐食傾向 (a), (b), (e)) が発生しにくいのに対して -3 m より浅いときには集中腐食が M. L. W. L. 直下に発生しやすく、水深が -3~-5 m では集中腐食の発生傾向は両者の中間である。この結果水深の大小は集中腐食の発生要因の一つではないかと推察されるので、このことを具体例でみている。例えば表-6.2 に函館港の集中腐食の発生状況を、図-6.1 に同港調査施設の水深を示す。表-6.2 と 図-6.1 から水深が浅いほど腐食傾向 (a) が発生しやすいことがわかる。しかし同一港内であっても場所によって水質が異なる懸念があるので次に同一施設と比較してみる。函館港西浜埠頭岸壁では図-6.2 に示すように水深が浅い G-1~G-3 では腐食傾向は (a)

注 1) 日本学術振興会：金属防蝕技術 便覧, 日刊工業新聞社 (1972) p. 830

注 2) 局部腐食が孔状に進行する腐食形態。一般に開口部の直径に比べ深さの大きい食孔を生じる場合をいうが破密な形状上の定義はない (金属防蝕技術 便覧, S. 47 年版, p. 836)

表-6.1 鋼矢板構造物の条件と腐食傾向

腐食傾向	水深			潮位差			根入長		淡水の存在		腐食期間				裏込め材	
	-3m未満	-3~-5m	-5m以上	0~1.0m	1.1~2.0m	2.1m以上	<5m	>5m	有	無	<20年	21~40年	31~40年	>40年	砂	割石
(a)	29	4	0	11	20	2	23	10	6	27	3	8	19	3	31	2
(b)	3	8	0	5	3	3	7	4	2	9	2	1	5	3	11	0
(c)	4	7	26	9	23	5	20	17	0	37	8	13	16	0	35	2
(d)	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
(e)	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0	1	1	0	2

腐食傾向	地域							コンクリート 上部工下端			鋼矢板のタイプ					
	北海道(太平洋側)	北海道(その他)	日本海側	太平洋側	山陽	四国	九州	H.W.L.上	H.W.L.~M.S.L.	M.S.L.下	ラルゼン	テルルージュ	クロックナー	YSP	FSP	
(a)	11	3	9	0	0	7	3	29	4	0	20	8	0	4	0	
(b)	1	1	4	1	2	1	1	5	3	3	4	2	1	4	0	
(c)	3	5	5	3	8	3	10	12	9	13	12	2	0	19	2	
(d)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
(e)	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	

腐食傾向	付着物		海水汚濁			海水の動き		方 向							
	多	少	大	中	小	大	小	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
(a)	3	21	14	12	7	11	27	6	3	5	0	7	3	5	4
(b)	1	9	5	4	2	6	5	1	3	1	2	1	0	1	1
(c)	4	33	17	8	12	16	21	9	7	3	2	7	3	2	1
(d)	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
(e)	0	2	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0

表-6.2 函館港における平均干潮面直下凸矢板（平坦面）の損傷状況

施設名	全凸矢板(枚)	調査凸矢板(枚)	穴のあいた凸矢板(枚)	穴の発生率(%)	穴の幅(cm)	穴の長さ(cm)
西浜埠頭G岸壁	258	178	75	42	28	83
西浜埠頭F岸壁	130	130	0	0	0	0
西浜埠頭E岸壁	251	251	4	2	8	27
海岸町船溜	222	222	155	70	29	94
海岸町A岸壁	230	219	61	28	18	104
万代町船溜および前面	395	244	38	16	20	33
万代町岸壁	316	219	113	52	21	37
浅野町岸壁	73	53	53	100	30	42

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

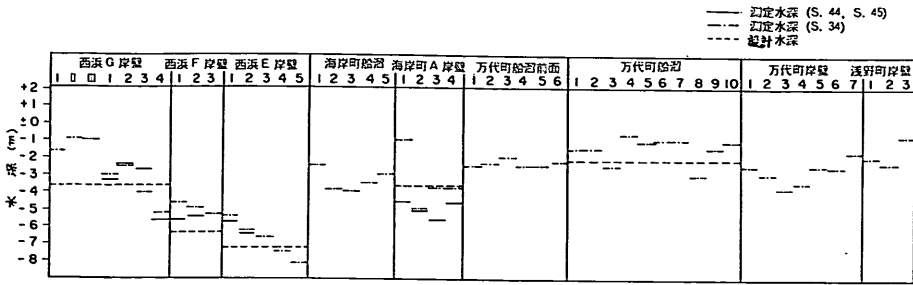


図-6.1 函館港における調査構造物の水深

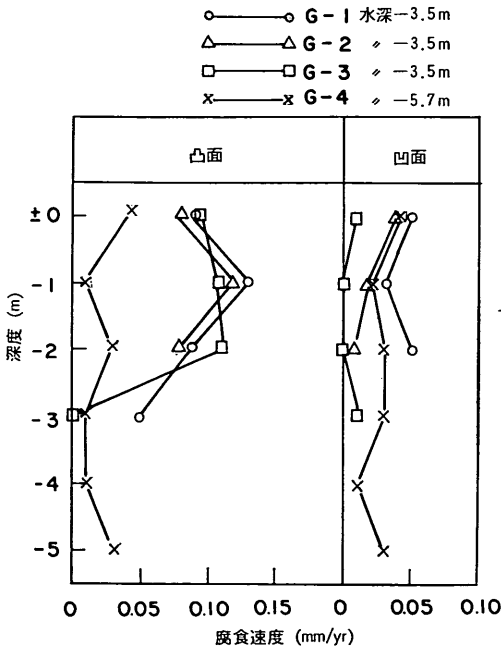


図-6.2 水深による腐食速度変化例
(函館港西浜埠頭G岸壁, 39年経過)

であったが、水深が深いG-4では腐食傾向は(c)であった。また萩港では-7.3m岸壁と-3.5m物揚場が並んでいるが腐食傾向は前者が(c)、後者が(b)であった。この外デンマークの港湾における鋼矢板腐食調査結果で腐食が最も激しかったところは漁港であったと述べている⁶⁾ことは構造物の水深の浅いことに関連しているのではないかと推察される。なおここでいう水深とは鋼矢板前面の水深を指す。

(2) 潮位差

表-6.1では潮位差を0~1.0m, 1.1~2.0m, 2.1m以上に3分類したが、腐食傾向発生件数の中には潮位差が0mの場合は含まれていない。表-6.1によれば鋼矢

板の腐食傾向と潮位差の大小との関係はあまりはっきりしない。すなわち潮位差が0.3m程度と小さいところでも腐食傾向(a)(恵曇港など)、腐食傾向(c)(富山港-7.5m岸壁など)が発生しているが、潮位差が約2mと大きいところでも腐食傾向(a)(油津港など)、腐食傾向(b)(坂出港など)、腐食傾向(c)(津久見港など)が発生している。

いっぽう松江港では水深が-2mと浅く淡水(湖水)に接していても鋼矢板には集中腐食が発生していない。松江港は宍道湖に面しており水位観測記録によれば季節による水位変化はあるが1日6時間ごとの水位変化はほとんどない。以上のことから集中腐食の発生に関係するのは潮位差の大小よりもむしろ潮位差の有無と考えられる。

(3) 根入長

表-6.1では根入長を5m以下と5m以上に分類したところ腐食傾向(a)の発生件数は根入長が5m以下の場合の方が5m以上の場合より約2倍大きい。鋼矢板構造物では根入長をD、壁高をH₀とするとD/H₀=0.5~0.65で一般に0.6程度が多いといわれる。したがって水深が5m以下となれば根入長も5m以下となるので、このことが表-6.1の根入長5m以下での腐食傾向(a)の発生件数に関連していると考えられる。いっぽう調査鋼矢板構造物の中にはD/H₀=0.5~0.65とならず根入長が7.2mで水深1m、根入長が6.2mで水深2m、根入長が5.2mで水深が3mなどの例があり、これらはいずれも根入長が5m以上であっても腐食傾向(a)が発生した。また広畑港岸壁では根入長が4mで水深が9m、根入長が4.5mで水深が7mのケースがあり、いずれも根入長が5m以下であっても腐食傾向(c)が発生した。以上のことから根入長と鋼矢板の腐食傾向との関係はあまりはっきりしない。

(4) 淡水の存在

表-6.1では鋼矢板構造物前面に淡水源(河川, 湖など)から淡水が流入する場合を淡水が有, 流入しない場合を淡水が無しとした。表-6.1によれば淡水が流入する場合にはいずれも集中腐食(腐食傾向(a), (b))が発生しており淡水の有無は腐食傾向に関係する。例えば恵曇港2号岸壁では宍道湖の湖水が日本海に流出する佐陀川の河口に位置して鋼矢板の腐食傾向(a)が発生したが, 全凸矢板平坦面の M. L. W. L. 直下の穴の発生率は佐陀川寄りか82%, 遠い方が39%であった。このような傾向は室蘭港中卯埠頭でもみられた。

いっぽう隅田川下流に位置する東京港豊海埠頭の鋼管杭でも M. L. W. L. 直下に腐食が集中した。鋼管杭は断面が円形で突出部がないため水深が浅くても集中腐食は鋼矢板に比べて発生しにくい, 水深が-5mの豊海埠頭で鋼管杭に集中腐食が発生したのは淡水の流入に関連すると考えられる。

(5) 腐食期間

Southwell & Alexanderは海水中鋼材片の腐食速度の経年変化を図-6.3のように示している。すなわち平均腐食速度は1年目は5.8 mpy=0.147 mm/yrと大きい, 経年とともに定常速度2.7 mpy=0.069 mm/yrとなり, 孔食速度も1年目の40 mpy=1.02 mm/yrから3 mpy=0.076 mm/yrに落ち着くという²⁸⁾。

日本の港湾で長期間経過した鋼矢板構造物について集中腐食が発生していない個所の腐食速度(≡マイクロ腐食

速度)は図-6.4のとおりである。なおこのときの腐食速度は両面(海側+陸側)についての値である。図-6.4では長期間経過した海水中の腐食速度(片面)は0.1 mm/yr以下となる。

孔食係数^{注)}の算出方法を参照して集中腐食個所について集中腐食量/マイクロ腐食量を算出してみると, 例えば腐食傾向(a)でラルゼンII形相当品の場合10.5 mm/(0.05 mm/yr×10~20 yr)=21~10.5となる。この値は図-6.3の孔食係数(3.2)より3~6倍大きい。しかし調査鋼矢板構造物では建設後何年間で穴があいたのかははっきりしないものが多い。表-6.1では腐食期間を建設から調査時までの期間としてみたところ腐食傾向と腐食期間とはあまり関係ない。

(6) 裏込み材

表-6.1では裏込み材の種類を砂と割石に分類したが一般には裏込み材として砂を使用することが多いため割石の調査例が少なかった。表-6.1では腐食傾向(e)の2例とも裏込み材が割石の場合に発生したことが目につく。

(7) 地域

調査鋼矢板構造物は北海道から九州までに散在している。したがって腐食傾向を北海道(太平洋側), 北海道(その他), 本州日本海側(東北地方の日本海側, 北陸, 山陰), 本州太平洋側(東北地方の太平洋側, 関東, 近畿), 山陽, 四国の九州の各地域ごとに分類してみた。表-6.1では水深の浅い鋼矢板構造物が古くからあった北海道, 本州日本海側, 四国地方などでは腐食傾向(a)が発生したことを示している腐食傾向と地域との関連性はあまり明らかではない。

(8) コンクリート被覆深度

調査鋼矢板構造物についてコンクリート上部工の下端深度を H. W. L. 上, H. W. L.~M. S. L., M. S. L. 下の3通りとして腐食傾向の発生件数を分類してみると表-6.1のようになった。なおコンクリート上部工下端が H. W. L. 上の場合には海側矢板面がむき出しのケースが多い。表-6.1によればコンクリート下端が H. W. L. 上の場合は腐食傾向(a)の発生件数が多くさらに腐食傾向(e)も発生しているが, コンクリート下端が M. S. L. 下の場合は腐食傾向(a)は発生しなかった。したがってコンクリート被覆深度と鋼矢板腐食傾向とは関係があると考えられる。いっぽうコンクリート中鋼材はアルカリ飽和のため不動態化して裸鋼材より貴な電位を示すので,

注) 孔食係数=最大腐食量/平均腐食量

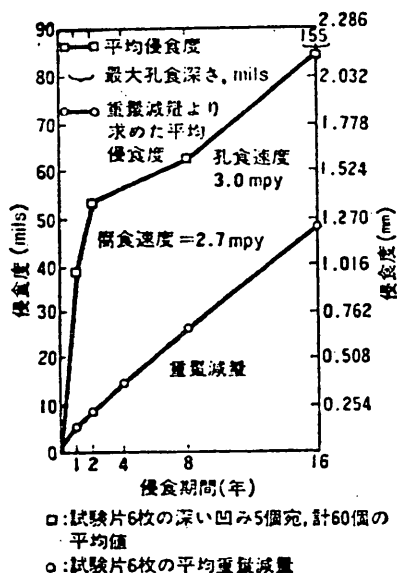


図-6.3 海水中における炭素鋼の腐食

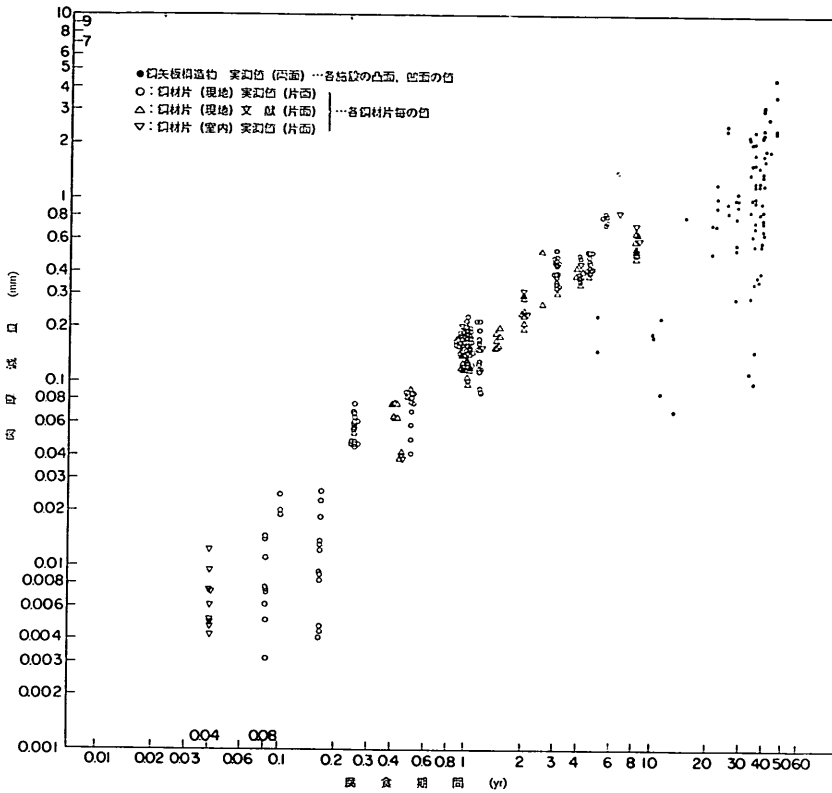


図-6.4 海水中における鋼材肉厚減量の経年変化

上部コンクリート被覆が海中まで下がっているとコンクリート被覆直下の裸鋼材面に腐食が集中するのではないかという意見がある。これに対してコンクリート被覆下端が海中まで下がっている調査鋼矢板構造物ではそのような心配はなかった。例えば大阪港5号岸壁と8号岸壁では地盤沈下のためコンクリート被覆下端が海中（前者は-5.4m、後者は-4.3m）に没していたが、両施設ともコンクリート被覆直下の裸鋼矢板面には集中腐食は発生しておらず腐食傾向は(c)であった。

(9) 鋼矢板のタイプおよび材質

調査鋼矢板は輸入品ではラルゼン形、テルルージュ形、クロックナー形、国産品ではYSP形、FSP形がある。このうちラルゼン形、テルルージュ形、YSP形が多くクロックナー形は1例、FSP形は2例と少ない。付表-6.1に調査鋼矢板の仕様を示す。

表-6.1では鋼矢板のタイプと腐食傾向とはあまり関係ない。むしろ表-6.1で分類した鋼矢板のタイプは鋼矢板の形状より鋼矢板の材質を示していると思われるの

で表-6.3に調査鋼矢板の材質と腐食傾向の関係を示す。表-6.3によれば鋼矢板の材質と腐食傾向との関連は特にならない。

海水中における鋼材腐食量と材質との関連については従来からいろいろ検討されている。例えばLarrabee³⁾は図-2.4に示すようにNi-Cu-P鋼と鋼矢板材との比較を示している。これによればNi-Cu-P鋼の耐食性は飛沫帯ではすぐれるが海中では鋼矢板と大差ない。またSouthwell & Alexanderは16年間の鋼材片の海水浸漬試験から定常腐食速度(図-6.3参照)を比較して鋼材の腐食速度は試験材の材質範囲^{注)}ではほとんど大差ないという。ただし既往の材質と腐食量との試験はいずれも試験材についてのものであって表-6.1または表-6.3は鋼構造物についての材質と腐食傾向(集中腐食の発生傾向)の関係である。

いっぽうN港では同一施設の延長上でラルゼンI形

注) 炭素鋼, 炭素鋼0.3% Cu, 2% Ni 鋼, 5% Ni 鋼, 3% Cr 鋼, 5% Cr 鋼, 低合金鋼

表-6.3 港湾における使用鋼材の材質試験結果

鋼 材	型	成 分 含 有 量 (%)									鋼 矢 板 腐 食 傾 向
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu		
鋼 矢 板	ラルゼン I	0.18	0.09	0.64	0.129	0.041	0.030	0.018	0.34	(a)	
"	" II	0.24	0.01	0.63	0.080	0.026	0.037	0.009	0.349	(b)	
"	" III	0.24	0.01	0.63	0.056	0.062	0.116	0.077	0.248	(b)	
"	" IIIa	0.23	0.07	0.52	0.092	0.066	0.092	0.095	0.41	(c)	
"	" 30	0.20	0.09	0.73	0.109	0.035	0.062	0.008	0.34	(a), (c)	
"	" V	0.12	0.51	1.15	0.087	0.025	0.05		0.36	(c)	
"	" V	0.22	0.02	0.57	0.082	0.053	0.03		0.33	(c)	
"	" III	0.19	0.01	0.58	0.036	0.034	0.036	0.012	0.349	(b)	
"	ラルゼン	0.07	0.01	0.43	0.060	0.058	0.041	0.007	0.066	(a)	
"	TR II	0.18	0.02	0.73	0.048	0.044	0.043	0.020	0.33	(a)	
"	" II	0.06	0.05	0.48	0.036	0.042	0.036	0.016	0.02	(a)	
"	" V	0.13	0.11	0.71	0.059	0.057	0.045	0.056	0.42	(c)	
"	YSP II	0.29	0.16	0.62	0.025	0.038	0.053	0.022	0.36	(b)	
"	" II	0.40	0.43	0.56	0.036	0.043	0.027	0.017	0.27	(a)	
"	" III	0.30	0.10	0.69	0.047	0.060	0.05	0.05	0.24	(b), (c)	
タイロッド		0.39	0.54	0.48	0.010	0.036	0.020	0.012	0.02	(a)	
"		0.38	0.11	0.62	0.036	0.042	0.057	0.060	0.17	(b)	
"		0.16	0.17	0.26	0.016	0.031	0.025	0.007	0.235	(b)	
"		0.10	<0.02	0.34	0.014	0.050	0.03	0.01	0.15	(c)	
ターンバックル		0.23	<0.02	0.59	0.024	0.022	0.03	0.03	0.26	(c)	
木杭先端金物		0.23	0.22	0.40	0.016	0.021	0.02	0.04	0.021	(c)	
縦 梃		0.13	0.21	0.36	0.014	0.035	0.120	0.047	0.329		
プレート		0.16	0.26	0.60	0.024	0.029	0.151	0.179	0.326		
斜 材		0.18	0.19	0.53	0.028	0.056	0.096	0.132	0.366		

(高さ 75 mm) とラルゼン II a 形 (高さ 135 mm) が同じ環境条件で使用されたが、このとき II a 形の方が I 形より集中腐食の発生がひどかった。このことから鋼矢板の断面形状は腐食傾向に関連することが推察できる。

(10) 付 着 物

長期間経過した鋼材面は錆生成物と海洋付着物によって覆われている。写真-6.1 に 39 年経過した鋼矢板面の付着物の例を示す。錆層は酸化程度によって緑色 (Fe(OH)₂)、黒色 (Fe₃O₄・nH₂O)、赤褐色 (Fe₂O₃・3H₂O) に分かれる。長期間経過した海水中鋼材面は黒色の 4~10 mm の錆層に覆われておりハンマで叩くと上層の固い錆層は一度に剥がれるが、その下は黒色の薄い錆層が鋼材面にさらに密着して除去しにくい。ただし集中腐食個所のように腐食の進行が著しいところでは赤橙色の柔い錆層が観察された。

海洋生物の付着は環境によって異なるが正常な海水中

では付着量が多く汚染海水中では付着量が少ない。例えば小樽港既町岸壁は外海に面して海水は正常で海水面付近では鋼矢板の凹面を埋めるほど多量に付着していたが、同じ港内の奥まったところにある信香町物揚場では海水の交換はほとんどなく海水は真黒で海洋生物の付着は少なかった。図-6.3 に示すように海水中の鋼材腐食速度が長期間では 2.7 mpy=0.069 mm/yr と小さくなる現象について、Southwell など²⁸⁾は腐食生成物の厚さが連続的に増加することによって金属面に到達する酸素の速度が減少するために腐食過程が抑制されるためとしている。またフジツボ、カキ、サンゴ、セルプラ、外殻に覆われたブリオニアのある種を含む 2, 3 の生物は腐食性の海水の浸入に対してしばしば効果的な防壁として不透性カルシウム層を作り、他の生物は酸素の拡散を妨げるため酸素を要する腐食反応を限定するという²⁹⁾。イギリスの市立技術研究所の試験によればセイロンのコ

ロンボ温帯水域中に浸漬した試験片には海洋生物の厚い層ができたため腐食速度は $0.0036 \text{ cpy} = 0.091 \text{ mm/yr}$ であり、Nova Scotia, Halifax の冷帯水域中の腐食速度 $0.0048 \text{ ipy} = 0.122 \text{ mm/yr}$ より少なかった²⁹⁾。また Florida, Keywest の海水中に浸漬した試験片では $0.062 \text{ in} = 1.57 \text{ mm}$ 厚のサンゴ被覆により8年間腐食しなかった例がある²⁹⁾。

この外 Tuthill 等は海水中の腐食は主として錆や海中生物の層を通過する酸素の拡散速度に支配されるとい³⁰⁾、LaQue は海水中鋼材面は海洋生物付着のため嫌気性条件下にあるという³¹⁾。

表-6.1 では海水面付近の付着物の厚さが数 cm 以上の場合を付着物が多いとし数 cm 以下の場合を付着物が少ないとした。表-6.1 では付着物が少ない方が腐食傾向 (a) の発生件数は多いが、付着物の多少と鋼板の腐食傾向との関係はあまりはっきりしない。

(11) 海水汚染

正常海水^{注1)}を何らかの形で汚した場合は汚染海水となるがさらに汚染海水下の海底泥層を含めて汚染海域ともいう。従来港湾では正常海水であったが近年汚染海域のところが増えてきた。汚染海水の水質試験結果例を付表-6.6~付表-6.7に、汚染海域の底質試験結果例を付表-6.8~付表-6.9に示す。

鋼材腐食に関しては各種廃水、河川水の流入、海水の腐敗、バクテリアの繁殖などが問題となる。この海水汚染を決める目安として pH、比抵抗、DO、COD、 NH_4^+ 、 S^{2-} 、硫酸塩還元バクテリア、酸化還元電位などが一般にあげられるがまだはっきりしない面がある。この中で硫酸塩還元バクテリアの鋼材腐食に対する影響が最も論じられている。硫酸塩還元バクテリアの腐食に対する役割は i) 腐食反応によって生ずる水素を酸化して復極をおこすこと^{注2)}、その結果発生する硫化水素が鉄と反応

してさらに腐食をすすめることで^{注2)}、硫酸塩還元バクテリア数が多いほど反応は活発になるという。これに対して Sharpley は腐食に関連するのは鋼材表面に密着して生息しているバクテリアで環境中に存在するバクテリア数を培養法で求めた数はこれらの値とは一致しないという³¹⁾。また汚染海水中では硫酸塩還元バクテリアの反応生成物である H_2S の検出方法は非常にむずかしい。この外汚染海水の一つである尼崎港と正常海水の久里浜港でテストピースの浸漬試験を行なったところ図-6.5、図-6.6に示すようになり両港における海水中の腐食量は大きな差なかった(ただしこの場合試験期間が僅か6ヶ月の

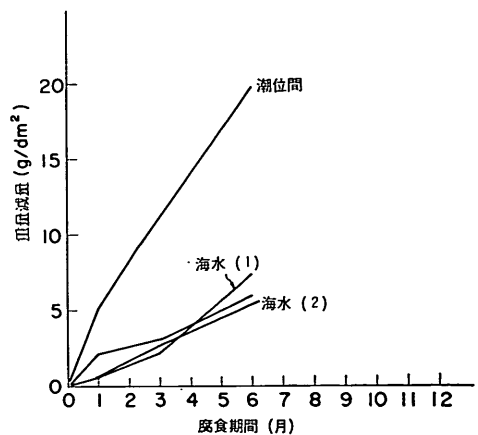


図-6.5 尼崎港堤内における鋼材片の腐食量変化

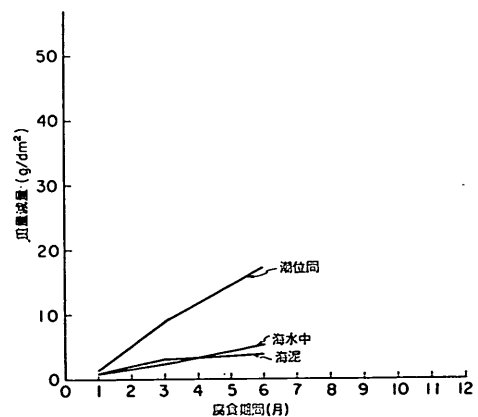
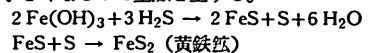


図-6.6 久里浜地区における鋼材片の腐食量

注 1) 正常海水は塩分 3.2~3.6%、塩素量 18~20‰ の範囲でその組成は付表-6.2 に示すように一定している。海水の特性は塩分濃度で変わるが塩素量 19‰ (塩分 34.3‰) の場合、水点 -1.9°C 、比重は 17.5°C で 1.0262 、比抵抗は $20 \Omega\text{-cm}$ 内外である。海面における正常な海水は空気を飽和しており (付表-6.3)、酸素濃度は水温により大体 5~10 ppm の範囲で変化し、pH は 8.1~8.3 であるがこれらの値は温度とともに変化する。付表-6.4 に 4 季による海水組成変化を、付表-6.5 に溶存酸素量の測定例を示す。

注 2) 陰極は発生する水素を硫酸塩をもって無機的に (無酸素状態で) 酸化して次のように復極反応をおこせるもので、酸素がなくても腐食はどんどん進行することとなる。
 $\text{H}_2\text{SO}_4 + 8\text{H} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$

注) 生じた硫化水素が鉄と反応して硫化鉄 (FeS) をつくりポロポロのさびを作って簡単に剝離するようになるばかりでなく容積が小さくなるので空隙を生ずる。



ため Southwell 等が述べているように最終定常値で比較してみる必要がある)。いっぽう Starkey は Kure Beach (North Carolina) の正常海水中に浸漬した鉄鋼試験片の腐食生成物中に硫酸塩還元バクテリアを発見し、硫酸塩還元バクテリアが非常に繁殖した鉄鋼試験片の腐食量は正常海水中の標準腐食量に等しいという²⁸⁾。Starkey の実験によって汚染海水中と同様に正常海水中でも鉄鋼試験片上に硫化物膜が規則正しく見られることが証明できるといわれる²⁸⁾。Southwell & Alexander は海水中と干満帯では異なった環境であるにも拘らず最終定常腐食速度が $2.7 \text{ mpy} = 0.069 \text{ mm/yr}$ と等しくなったことについて、腐食速度が安定化後は鋼の腐食はいずれの海水環境においても厚いスケールと自己補修作用を持つ生物体付着の被覆の結合体の下で成育する嫌気性バクテリアによっておそらく支配されるという²⁸⁾。また LaQue は海洋生物で覆われた鋼材面は嫌気性条件になるといい⁴⁾、Larrabee は正常海水中鋼材の定常腐食速度は最初の 20 年間は $2 \text{ mils/yr} = 0.05 \text{ mm/yr}$ 、20 年以後は $1 \text{ mil/yr} = 0.025 \text{ mm/yr}$ という¹³⁾。

以上のように汚染海域における鋼材腐食に関する汚染因子ははっきりしない現状であり、また調査鋼構造物についての汚染の経緯も明らかでない。

したがって表-6.1 では調査時点で黒くて透視度が非常に悪い海水を汚染が大、泳いでいる魚が見えるように透明な海水を汚染が小、両者の中間の海水を汚染が中と簡単に分類した。表-6.1 によれば鋼矢板の腐食傾向(a)と(c)はどちらも海水汚染が大、中、小の場合でも発生しており鋼矢板の腐食傾向と海水汚染とは特に関係なさそうである。これを具体例でみてみると、例えば海水汚染が大であった富山港における鋼矢板の腐食傾向は -7.5 m 岸壁では(c)であったが -3 m 物揚場では(a)が発生した。いっぽう海水汚染が小の恵曇港 2 号岸壁、佐陀川護岸などでは腐食傾向は(a)であった。さらに鋼矢板構造物では腐食傾向が(a)の場合同一海水に接して凸矢板平坦面のみ、また腐食傾向(e)では凸矢板と凹矢板のそれぞれ平坦面のみが発生する集中腐食の現象は海水汚染からは説明できない。また汚染海水中の鋼管杭(東京豊州埠頭)では集中腐食個所以外の腐食速度は 0.1 mm/yr 以下であり、このような傾向は汚染がひどい尼崎港間・水門施設でもみられた。

海水汚染が大の北湊港では鋼矢板の腐食傾向(a)が発生したが、海泥中の腐食速度は 0.01 mm/yr (片面)以下と小さく 34 年後でも鋼矢板のタイプを示す記号や製

造番号などが残っておりほとんど新品同様であった。

(12) 海水の動き

表-6.1 では調査鋼矢板構造物が船溜のように港内の奥まったところであって鋼矢板前面の海水の動きはほとんど潮位の昇降のみによる場合を海水の動きが小、そうでない場合を海水の動きが大と分類した。表-6.1 によれば鋼矢板の腐食傾向は海水の動きの大小にはあまり関係ない。例えば根室港では船溜の奥深いところにある -4 m 物揚場(旧鋼矢板部分)の腐食傾向は(a)であるのに対して堤外で外洋に面している -5 m 岸壁(旧鋼矢板部分)でも同様に腐食傾向は(a)が発生した。これに対して小樽港では港口にあつて海水の動きが大きい厩町岸壁の腐食傾向は(c)であるが港内の一番奥まったところにあつて海水の交換がほとんどない信香町物揚場の腐食傾向は(e)であった。

いっぽう中性溶液中の鋼材腐食速度は限界流速以下では流速が大きくなるにつれて増加するが、これは流速によって酸素供給速度が増すためといわれる。しかし長期間経過した調査鋼構造物では腐食生成物と海洋生物の厚い層(写真-6.1 参照)に覆われるため流速による影響は裸鋼材に比べて少ない。Southwell などの説によれば腐食生成物と海洋生物の付着層の下では酸素欠乏のため嫌気性の硫酸塩還元バクテリアの作用で腐食が進行して $2.7 \text{ mpy} = 0.069 \text{ mm/yr}$ と小さな最終定常値に達する。この考えによれば厚い付着物で覆われた鋼材の腐食に対しては流速はほとんど関係しないことになる。例えば海水を約 8 ft/sec の速さで吸上げる大口径管に厚い生物付着があるときの腐食量は動かない海水中で同じ生物が付着した試験片の腐食量より少ないという²⁹⁾。また海中生物は流速の低い期間に付着し障壁層として働いて防食性障壁層の外側における高流速の加速作用を減少もしくは消滅させることがありうるという³⁰⁾。しかし防砂堤などのように砂の動きで鋼材面に生ずる錆層を除去して裸鋼材面を露出させる場合には裸鋼材の場合と同様流速の影響が大きい。

また流速によって溶液が均一化されるため局部腐食^{注)}は減少するともいう。この外海水中で鑄鉄円板を回転させると周速度の速い周囲より速度の遅い中心部の方が腐食が激しかった実験例がある³²⁾。これは海水の流速 1 m

注) 腐食が表面全面に均一に進行せず局部的に集中しておきた状態をいう。腐食電池のアノードの位置が固定される場合に生じる。孔食、すきま腐食などが代表的な例である(金属防蝕技術便覧 p. 833)。

/s 当り電位が約 33 mV 貴になるため回転円板の中心部が周囲に対してアノードになったことによるといわれる。これに対して鋼矢板構造物では凸面前面の方が凹面前面より流速が大きいと仮定すると流速の遅い凹面がアノードとなり凹面海側の腐食が加速されることになるがこのような現象は見られなかった。

(13) 方 向

表-6.1 に示す方向は鋼矢板平坦面(凸面, 凹面)の方向である。表-6.1 によれば平坦面の向きは H. W. L. 下の鋼矢板の腐食傾向には特に関係しない。むしろ方向が関係するのは H. W. L. 上の腐食であろう。

(14) 船または木材などの接触

鋼矢板の腐食傾向(a) (図-5.2 参照) の発生因の一つに船または木材などの接触による影響があげられる。これに対して木材を貯木する今治港浅川荷揚場では木材の接触する凸面で最も腐食がひどい個所の腐食速度は 0.1 mm/yr (両面=海側+陸側) 程度である(図-5.8 参照)。もし腐食傾向(a) の発生因が船または木材の接触作用によるものとする腐食傾向(d), (e) のように船または木材が接触しない凹面に腐食が集中する現象が説明できない。また船または木材が接触するおそれのない閘門, 水門の補剛材などにも集中腐食が発生していることから船または木材の接触が腐食傾向(a) の直接の発生因とは考えられない。いっぽう Brouillette & Hanna は San Diego 港の米海軍基地の鋼矢板調査を 1959 年と 1965 年に行なったが M. L. W. 2 ft 下の腐食は 1959 年より 1965 年の方が著しかったと報告している。この理由として 1959 年のときは小舟の接触で M. L. W. 直上部の腐食生成物が除去されていたが 1965 年のときは小舟が使用されておらず M. L. W. 直上部の腐食生成物が除去されていなかったことをあげている。彼等の説によれば小舟の接触は M. L. W. 直下の腐食を小さくすることになる。なお防砂堤の調査例によれば海底砂面直上部はサンドエロージョンによって腐食が大きいといわれるが表-6.1 には防砂堤の調査例は含まれていない。

(15) 水深による溶存酸素量差

海水面に近い海水の方が海泥面に近い海水より溶存酸素量が多いであろうから海水面付近の方が腐食が激しいのではないかとする見方がある。しかし例えば腐食傾向(a) の場合凸矢板平坦面では M. L. W. L. 直下に腐食が集中して腐食速度は 0.5~1.0 mm/yr と大きく M. L. W. L. 下数 10 cm 以深では腐食速度は 0.1 mm/yr 以下と小さくなるが, 凸矢板側面, 凹矢板の平坦面と側面で

はいずれも深度方向による腐食速度差はみられず 0.1 mm/yr 以下である。いっぽう水深による溶存酸素量は例えば付図-6.1 のように変化するといわれるが, 調査鋼矢板構造物前面の海水では水深による溶存酸素量差はほとんどない。以上のことから水深による溶存酸素量差から鋼矢板の腐食傾向は説明し難い。

(16) 迷走電流^{注1)}

ニューヨーク港クリントン埠頭での鋼矢板腐食傾向は(b)に相当するが, 図-3.3 のように凸面の方が凹面より腐食量が多い理由として調査者達はかつて埠頭近くを通っていた電気軌道からの迷走電流が凸面より海水中に流出したのではないかと推察している¹²⁾。しかし表-6.1 の調査例では恵曇港など集中腐食が発生した施設では電気軌道などの直流電源がなく, 反対に電気軌道が近くにあった富山港 -7.5 m 岸壁の鋼矢板の腐食傾向は(c)であった。これらのことから鋼矢板の腐食傾向の発生には迷走電流の影響は特になく考えられる。

(17) 初期肉厚および肉厚測定箇所

ニューヨーク港クリントン埠頭で凹矢板より凸矢板の方が腐食量が多いことを不審として調査者達ははっきりした根拠もなしに初期肉厚 7/16 in=11.11 mm を 8/16 in=12.70 mm に変えてみたり, また厚み計探触子を押しあてる位置が鋼矢板凸面, 凹面の中心部より左右にずれたことを理由の一つにあげたりしている^{12)注2)}。これに対して表-6.1 の破壊調査のうちで上部コンクリート中の矢板肉厚を初期肉厚とした場合でも鋼矢板腐食傾向は(a), (b), (c)とも発生している。また表-6.1 の調査鋼矢板は付表-6.1 に示すように凸面, 凹面とも平坦で特に中心部の肉厚が最小ということはない。

(18) 温 度

一般に鋼材腐食速度は温度とともに増加するといわれるが温度上昇にともなって腐食生成物の溶解度および物理的性質, 溶存酸素量の変化などがおこるので腐食速度に対する影響は複雑である。なお海水中の鋼材腐食に最も影響する溶存酸素量に限ると溶存酸素のある水中での

注1) stray current, 大地や水路など意図された回路以外の経路を流れる電流であるが大地内に存在する地電流であることもある。この種の電流が金属体に流入すると電流が再び土壌または土中に流出する個所で金属体が陽極として激しく侵食される。通常自然に存在する地電流はその量が小さくしかも存続期間が短かいので腐食の立場からみると重要でない(電食防止研究委編, 電食・土壌腐食ハンドブック, p.5)。

注2) クリントン埠頭の鋼矢板(PA-15)の凸面, 凹面の肉厚は中心部が7/16 in で最も薄い。

鋼の腐食速度は温度 10°C の上昇によって約 30% 増加するという。付表-6.4 によれば日本の港湾では海水の温度は季節によって最高 20°C 位異なる。しかし温度変化からは特定の深度、断面に発生する集中腐食の現象は説明できない。また長期間経過した鋼構造物では腐食生成物と海洋生物の厚い層に覆われるため温度上昇による腐食速度の増加は裸鋼材ほど大きくない。例えば鋼材片の腐食速度は温帯水域で 0.091 mm/yr, 冷帯水域で 0.122 mm/yr であった試験結果がある²⁹⁾。

(19) その 他

浜坂漁港内東防波堤では鋼矢板(Ⅲ形相当品)が使用されたが波によってがぶられて 17 年未満で海中部分で破断した例がある。これは一種の腐食疲労の現象と思われる、破断個所の腐食速度は 0.8 mm/yr (両面)^{注)} 以上であった。これに対して表-6.1 の調査例はけい船施設のため鋼矢板の揺れはなく応力腐食の影響はない。この外鋼材腐食に影響する要因として光などもあげられるが表-6.1 に示す鋼矢板構造物の腐食傾向に特に関係するとは考えられない。

以上のことから鋼矢板の腐食傾向に対する要因として

は、(i)水深、(ii)潮位差の有無、(iii)淡水の有無、(iv)コンクリート被覆深度、(v)鋼矢板の形状(突出部の大小)、(vi)裏込み材の種類が考えられ、これに海側の潮位差の有無に相当する陸側の(vii)残留水位の変動が加わる。

6.1.2 要因分析による要因効果の検討

鋼矢板腐食傾向の発生状況から腐食傾向に対するいくつかの要因が指摘されたが、これらの要因には水深のように量で与えられるものと淡水の有無のように質で与えられるものが含まれている。いっぽう外的基準(分析対象)は鋼矢板腐食傾向(a), (b), (c), (d), (e)のように質で与えられる。調査構造物は長期間経過しているために量で与えられるデータは必ずしも正確ではなく、さらに長期間の経年変化を加味することはむずかしい。また外的基準が質で与えられた場合は定性的な調査データを利用するには便利であり、さらに構造物の腐食対策を選定するにも腐食傾向の推定で十分役に立つものと考えられる。したがってここでは外的基準も要因もともに質で与えられるケースとして鋼矢板構造物の腐食調査結果について要因分析^{注2)}を行なった。

表-6.1 に示す鋼矢板調査例のうち腐食傾向(a), (b),

表-6.4 アイテム・カテゴリー

アイ テ ム	カ テ ゴ リ ー	アイ テ ム	カ テ ゴ リ ー	
1. 水 深	1. <-3m	7. 上部コンクリート下端	1. H. W. L. 上	
	2. -3~-5m		2. H. W. L. ~M. S. L.	
	3. >-5m		3. M. S. L. 下	
2. 潮 位 差	1. 0~1.0m	8. 鋼矢板タイプ	1. 輸 入	
	2. 1.1~2.0m		2. 国 産	
	3. 2.1m~	9. 付 着 物	1. 多	
3. 根 入 長	1. <5m		2. 少	
	4. 淡 水 の 有 無	1. 有	10. 腐 食 期 間	1. <20年
2. 無		2. 21~30年		
5. 地 域	1. 北 海 道 (太平洋側)	11. 海 水 の 動 き		1. 大
	2. " (その他)		2. 小	
	3. 日 本 海 側	12. 方 向	1. N	5. S
	4. 太 平 洋 側		2. NE	6. SW
	5. 四 国		3. E	7. W
	6. 九 州		4. SE	8. NW
6. 海 水 汚 濁	1. 大	2. 中	3. 小	

注1) 裏込めがない状態で使用されたので両面とも海水に接した。

注2) 数量化理論第2類の外的基準が3分類のケース。

(c) 3通りに属するサンプル 80 個について表-6.4 に示す要因 (アイテム・カテゴリー) で分析を行なった。この場合の外的基準は腐食傾向 (a), (b), (c) である。分析の結果重相関係数 ρ は次元-1 では 0.91, 次元-2 では 0.71 であった。 ρ^2 は要因分析の結果からどの程度の外的基準の変動が説明できるかの比率を示す値として用いられるが、表-6.4 の要因変化によってそれに関連しての腐食傾向の変動が次元-1 では 83%, 次元-2 では 50% 説明できることになる。次に各要因の腐食傾向への寄与度を調べるために各要因の偏相関係数を求めてみると図-6.7 のようになる。後述するように次元-1 の値は腐食傾向 (a), (b) のグループと (c) との判別に、次元-2 の値は腐食傾向 (a) と (b) との判別に使用できることから、集中腐食 (腐食傾向 (a), (b)) の発生には水深とコンクリート被覆深度の影響が大きいことがわかる。さらに各カテゴリーの腐食傾向に対する度合いを見るためにカテゴリー数量^{注1)} (x_{jk}) を求めてみると図-6.8 のようになる。なお図-6.8 の数量は結果を見やすくするために数値の総平均が 0 になるようにしてある^{注2)}。した

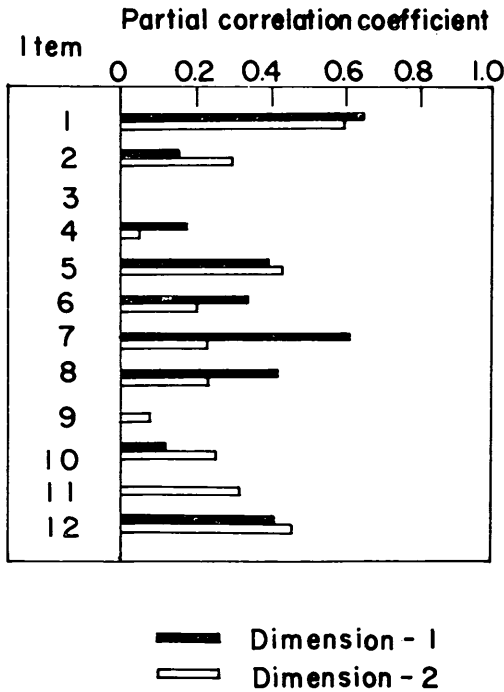


図-6.7 要因の腐食傾向への寄与度

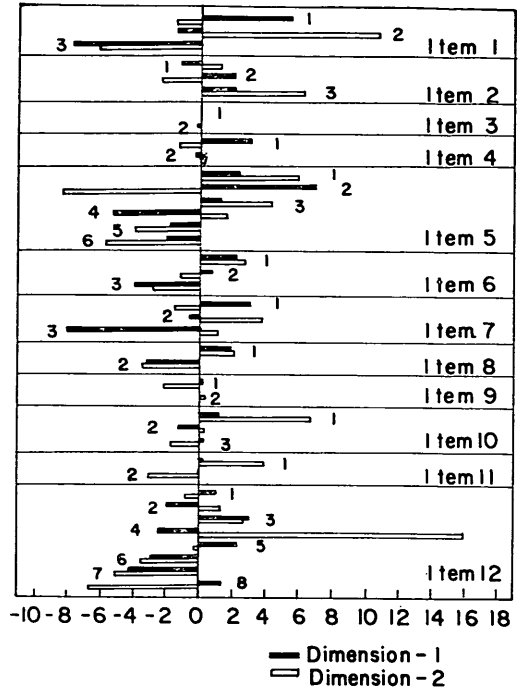


図-6.8 カテゴリー数量

がって図-6.8 で正の方向に線の向きのあるカテゴリーは腐食を大きくする方向に、負の方向に線の向きのあるカテゴリーは腐食を小さくする方向に作用していることを示す。図-6.8 より集中腐食は水深が浅いほど発生しやすく、またコンクリートのかぶり M.S.L. 下まで下がっているほど発生しにくいなどの傾向がわかる。

6.2 集中腐食とマクロ腐食

日本の港湾鋼構造物に使用されている鋼矢板、鋼管杭、I 形鋼、山形鋼などではある特定個所のみ腐食が集中して断面の急減が起り、著しい場合には集中腐食のため鋼構造物が比較的短期間で使用不能となった。これに対して従来港湾構造物の設計では海中の腐食速度として 0.1 mm/yr (片面) が使用されているが、この値はマイクロ腐食速度であって上記のような集中腐食はまったく加味されていない。また港湾鋼構造物に発生する集中腐食の現象はマイクロ腐食からは説明できない。したがって集中腐食の発生する長尺鋼材の腐食と鋼材片の腐食との差異を明確にするために次の実験を行なった。

図-6.9 に示すように同一ガラス容器内に A (粘土)、B (砂) 2 種の環境を詰めて鋼材片 A₁, B₁, C₁, A₂, B₂ を埋設する。A₁, B₁ は A, B それぞれの環境中に単独に埋設された鋼材片であり、C₁, A₂, B₂ は A, B 2 種の環

注1) アイテム j , カテゴリー k に与えられる数量を x_{jk} と表わす。

注2) 図-6.8 の横軸は表-7.1 で求めたカテゴリー数量 x_{jk} からカテゴリー数量の平均 x_j を差引いた値 ($x_{kj} - x_j$) である。

境を貫通する状態の長尺鋼材に相当する。腐食速度は単独鋼材片では $A_1 < B_1$ であるが長尺材では $A_2 > B_2$ となる。また C_1 も写真-6.2 に示すように B 環境中の鋼材 (B_2 に相当) はほとんど初期の研摩面がそのまま残っているが、A 環境中の鋼材 (A_2 に相当) は腐食が激しい。この結果従来のように単一環境中の鋼材片 (A_1, B_1) の腐食で異種環境にまたがる長尺鋼材 (C_1 または A_2, B_2) の腐食を処理することは正しくないことがわかる。なお Markovic 等は不飽和土壌中では粒子と鋼材との接触部分がアノードとなって腐食するため孔食が発生するとい³³⁾、これは図-6.9 の単独鋼材片 B_1 についてのことであって長尺鋼材 B_2 (または B 層中 C_1) については該当しない。

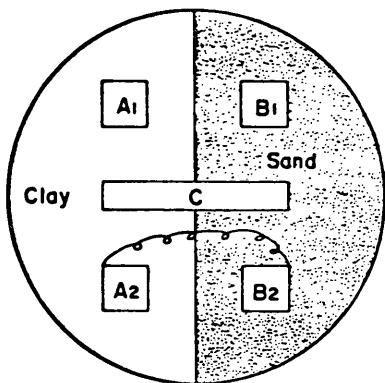
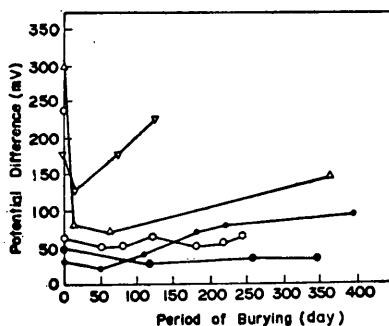


図-6.9 試験片埋設状況

図-6.9 の実験のように長尺鋼材の腐食速度が $A_2 > B_2$ となる現象は Evans の実験からわかるように環境 A, B 間の酸素濃度勾配に起因する。すなわち酸素が多い方の電極電位が相対的に貴となり酸素が少ない方の電極電位が相対的に卑となるためである。図-6.9 の A_2, B_2 の電位を測定してみると A_2 の電位が B_2 の電位より約 100 mV 卑となった。したがって異種環境を長尺鋼材が貫通するとき酸素量が相対的に多い環境中鋼材の電位が貴、酸素量が相対的に少ない環境中鋼材の電位が卑となり、前者がカソード(陰極)、後者がアノード(陽極)となる。この結果図-6.9 の実験の長尺鋼材では A 層中鋼材 (A_1 または C_1 の A 層中部分) がアノード、B 層中鋼材 (B_2 または C_1 の B 層中部分) がカソードとなるマクロ腐食電池が発生して A_2 より B_2 へマクロ腐食電流が流出したため A_2 (または C_1 の A 層中部分) が激しく腐食し、反対に B_2 (または C_1 の B 層中部分) は A_2 (または C_1 の A 層中部分) から流入する電流によってちょうど

電気防食されたかっこうとなったためほとんど腐食しなかった。いっぽう A_1, B_1 の腐食速度は A 層中、B 層中の酸素量に応じて $A_1 < B_1$ となった。

集中腐食をマクロ腐食で説明しようとするときまずマクロ腐食電池の永続性が問題となる。そこで図-6.9 の A, B の環境をいろいろ変えて $A_2 \sim B_2$ 間の電位差の経年変化を測定してみると図-6.10 に示すようになりマクロ腐食電池の永続性は十分ある。次に図-6.9 の B_2 と A_2 の表面積比(カソード, アノード表面積比, A_c/A_a) に対する A_2, B_2 の関係は図-6.11 (A_2), 図-6.12 (B_2) のようになる。なおこのときの腐食速度は重量減量より求めたものである。また B 層が海水, A 層飽和砂層のときの A_c/A_a と A_2 の関係を図-6.13 に、B 層が水道水, A 層が飽和粘土のときの A_c/A_a と A_2 の腐食速度の関



- : Sea water ~ saturated sand layer
- : Sea water ~ saturated clay layer
- ▽ : (Sea water) Unsaturated sand layer-saturated sand layer
- ◐ : Sea water ~ saturated sand layer
- △ : Fresh water ~ saturated sand layer

図-6.10 電位差の経日変化

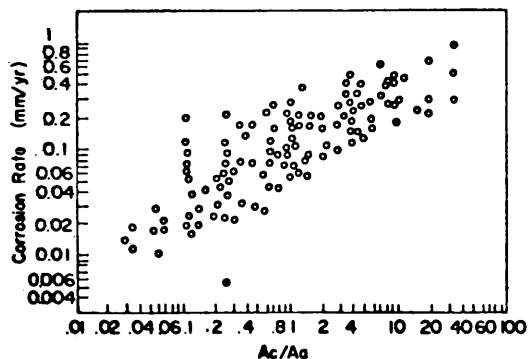


図-6.11 飽和粘土層中鋼材 (A_2) の腐食速度と A_c/A_a の関係

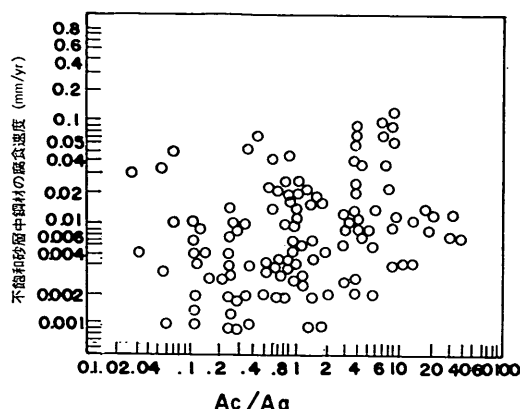


図-6.12 不飽和砂層中鋼材(B₂)の腐食速度と A_c/A_a の関係

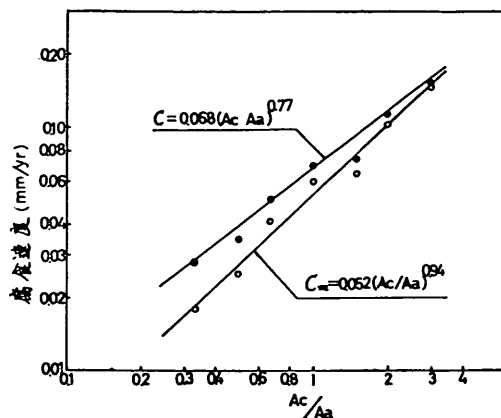


図-6.14 腐食速度と A_c/A_a の関係
(試験期間 363 日)
カソード環境：水道水
アノード環境：飽和粘土

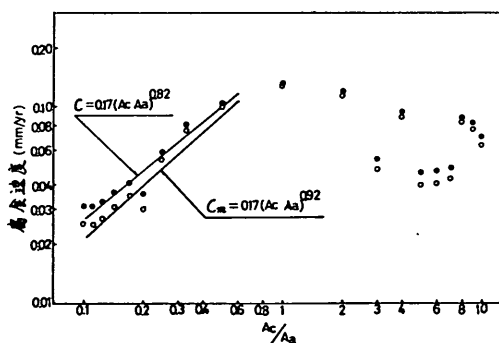


図-6.13 腐食速度と A_c/A_a の関係例
(試験期間 41 日)
カソード環境：海水
アノード環境：飽和砂層

係を図-6.14に示す。なお図-6.13、図-6.14の黒丸は重量測定による値で、白丸は重量測定値からマイクロ腐食速度(A_i)を差引いたときの値である。以上のことからマクロ腐食速度は A_c/A_a にはほぼ比例する傾向のあることがわかる。ただし図-6.13(Bが海水の場合)では $A_c/A_a > 1$ のときマクロ腐食速度は A_c/A_a に比例していないが、これは海水が静止状態であったことに主として起因する。港湾環境では酸素の豊富な環境として海側では干渉帯、陸側では残留水位上がある。現地において電位を測定したところ海側では M.L.W.L. 直上部が M.L.W.L. 下に対して 100 mV 程度貴となり、陸上部も残留水位直上部が残留水位下に対して約 100 mV 貴となった。したがって港湾鋼構造物では M.L.W.L. 直上部と残留水位直上部は強力なカソード域となり得る。

次にマクロ腐食で集中腐食を説明する場合マクロ腐食電流密度の分布状態が問題となる。図-6.15～図-6.17にカソードとアノードの界面(以下単に界面という)からの距離とマクロ腐食電流との関係を示す。なお図-6.15～図-6.17の実験では空気中で乾燥した発錆鋼材片をカソード、浸液中の発錆鋼材片をアノードとした。図-6.15～図-6.17からわかるようにマクロ腐食電流の流出は A_c/A_a が一定のときには水溶液の比抵抗が海水の値より大きくなると界面付近のアノード域に集中する傾向が強い(比抵抗が 1,000 $\Omega\text{-cm}$ 付近がこの傾向が顕著である)。また水溶液の比抵抗が一定のときは A_c/A_a が大きいほどマクロ腐食電流の流出は界面付近のアノード域に集中する傾向があり、水溶液の比抵抗が海水比抵抗

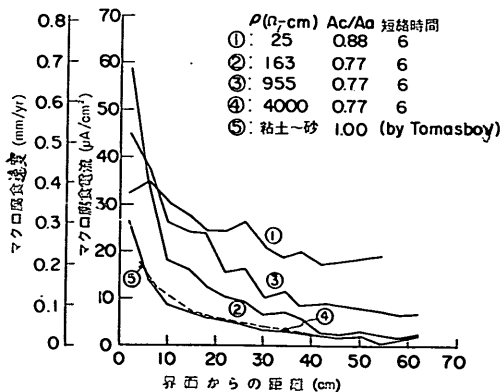


図-6.15 マクロ腐食速度におよぼす比抵抗と距離の影響

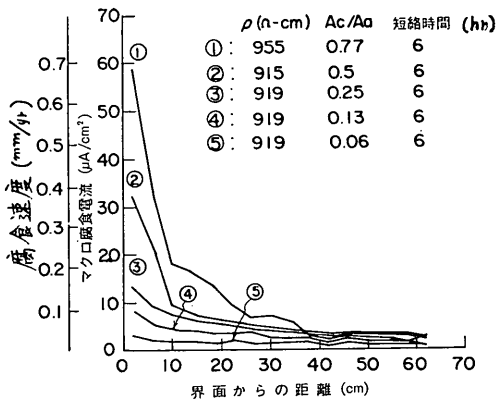


図-6.16 A_c/A_a によるマクロ腐食電流変化 (1)

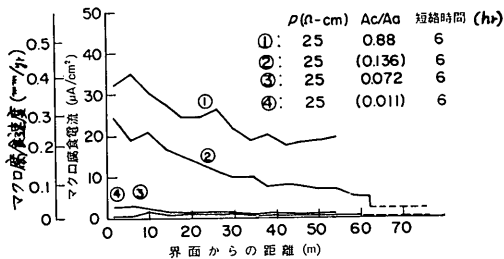


図-6.17 A_c/A_a によるマクロ腐食電流変化 (2)

より大きくなるほどこの傾向は著しい。

6.3 鋼矢板構造物の腐食傾向の発生条件

6.1 では鋼矢板腐食傾向の発生状況から腐食傾向に影響すると思われるいくつかの要因を抽出した。ここでは抽出した要因と 6.2 に示すマクロ腐食の発生傾向から鋼矢板腐食傾向の発生条件を考察する。

(1) 潮位差の有無

腐食傾向 (a), (b), (c) における集中腐食の発生深度は表-5.10 に示すように M.L.W.L. 直下付近であるが、このことは M.L.W.L. 面を抜んで上下方向にマクロ腐食電池が発生することを意味する。この場合 M.L.W.L. 直上部がカソード, M.L.W.L. 下がアノードとなる。したがって集中腐食がマクロ腐食によるものであればマクロ腐食電池発生のためカソード域の存在が不可欠となる。これに対して松江港では集中腐食の発生しやすい他の条件は揃っていたが 1 日 6 時間ごとの水位変化がほとんどなかったために集中腐食は発生せず腐食傾向は (c) であった注)。これは水位変化がほとんどないためにマ

クロ腐食電池のカソードが発生しなかったためと推察される。この外同じ調査地点でコンクリート被覆下端が H.W.L. 上と M.S.L. 付近注) の 2 通り存在する構造物があったがどちらの場合にも M.L.W.L. 直下に集中腐食が発生した例がある。これはマクロ腐食電池のカソード域を示す一資料である。

(2) 水深

表-6.1 では集中腐食 (腐食傾向 (a), (b), (c)) は水深が浅いほど発生しやすい傾向が見られる。これに対して図-6.11 に示すようにマクロ腐食速度は A_c/A_a (カソード, アノード表面積比) にほぼ比例する。もし鋼材が同一断面であれば A_c/A_a はマクロ腐食電池のカソード, アノード域の鋼材の長さ比に相当する。したがってマクロ腐食電池のアノードは (水深+根入長) となる。しかし海水と海泥の比抵抗の比は 1:10 位でありまたマクロ腐食電流の流出分布密度は界面 (M.L.W.L.) に近いほど著しい傾向があるため、マクロ腐食電池のアノードをほぼ水深とみなし得る。いまカソード域 (A_c) を一定と仮定すると A_c/A_a の値は A_a が小さくなるほど、すなわち水深が浅くなるほど大きくなり、この結果マクロ腐食電流が M.L.W.L. 直下付近から大量に流出して集中腐食が発生することになる。因みに $A_c \equiv 0.3 \text{ m} \sim 0.4 \text{ m}$ とすると $-3 \sim -4 \text{ m}$ の水深では $A_c/A_a \equiv 0.1$ となる。

(3) 淡水の有無

海水に淡水が流入するとき図-6.18 の 3 通りの混合形式があり潮位差の小さい日本海側では (a), 潮位差の大きい太平洋側では (b), 潮位差が大きく河水の流量が比較的少ないところでは (c) となるといわれる。淡水が海水に均一に混入する場合比抵抗の増加とともにマクロ腐食電流の流出は界面付近のアノード域で急増し、この傾向は比抵抗が数 100~1,000 $\Omega\text{-cm}$ 付近のとき最も著しい。

もう一つの淡水の影響には図-6.18 の (b) の場合がある。このときマクロ腐食電流の大半は界面付近のアノード域から流出するがさらに淡水の方が海水より比抵抗が

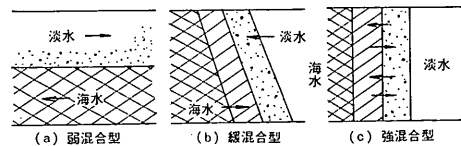


図-6.18 淡水と海水の混合形式

注) 鋼材片を一部浸液したとき水線部直下が腐食するといわれるが港湾では風、波などによって海水は絶えず動いており静止状態とならないため水線腐食は生じなかった。

注) M.S.L.+1.1 m, コンクリート被覆下端 +1.0 m。

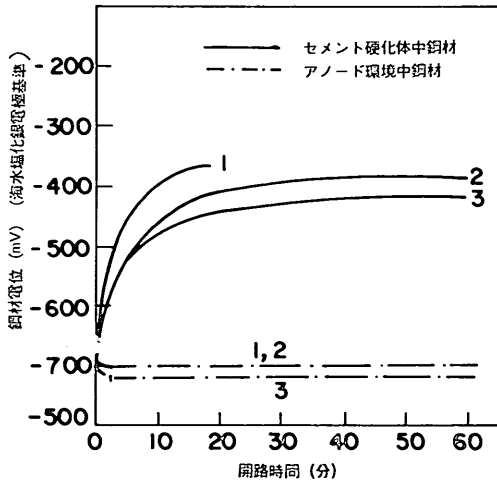
非常に大きいため A_a としては海水の上層に位置する淡水層の厚さに近似できる。この結果水深が大きくても淡水と海水が層を成す場合には見掛け上の A_c/A_a が増大して著しい集中腐食の発生が予想される。

(4) コンクリート被覆深度

表-6.1によれば集中腐食は上部コンクリートの下端深度が M.S.L. 上るとき発生しやすく M.S.L. 下まで下がっているときには発生しにくい。これは M.L.W.L. 直上部のマクロ腐食電池のカソード域が裸鋼材かコンクリートで被覆された鋼材かの差が現われていると思われる。図-6.19は鋼材がセメント硬化体と他の1層に接するときの開路後の電位変化である。すなわちセメント硬化体中鋼材は他の環境中裸鋼材より貴な電位となる。したがって M.L.W.L. をコンクリートで被覆すると湿っているコンクリート中鋼材がカソード、M.L.W.L. 下の裸鋼材がアノードとなる。このときコンクリート中鋼材に M.L.W.L. 下の裸鋼材より流入するマクロ腐食電流密度は $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度である。なおこの電流量はコンクリート(塩化物含有)中鋼材に対する電気防食所要電流量に相当するので M.L.W.L. 上のコンクリートで被覆した鋼材はマクロ腐食電流でちょうど電気防食されたかっこうとなる。したがってカソード域では電防効

果が期待できる。すなわち流入電流量に相当する電極反応で生成する OH^- のためコンクリート中鋼材の表面付近のアルカリ性は増加するので鋼材は長期間不動態に保たれ、またコンクリート中鋼材の電位差が消滅する。なおコンクリート中鋼材に流入する電流密度が $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下ではコンクリートの付着強度の低下はないといわれる³⁴⁾。

いっぽう M.L.W.L. 下の裸鋼材から流出するマクロ腐食電流は図-6.20に示すように海水中では急減してしまい $A_c/A_a < 1$ ではマクロ腐食速度は無視できるほど小さい。この結果コンクリート被覆を M.L.W.L. まで下げた場合 M.L.W.L. 下の裸鋼材のマクロ腐食による損傷はほとんどないことが予想される。事実コンクリート被覆が M.L.W.L. 下まで下がっていた調査鋼構造物ではコンクリート直下の裸鋼材面には集中腐食の現象は見られなかった。1例として写真-6.3にコンクリート被覆直下の鋼矢板面を、写真-6.4にコンクリート被覆直下の鋼管杭面を示す。以上のことからマクロ腐食電流のカソードをコンクリート中鋼材とするためコンクリート被覆を少なくとも M.L.W.L. まで下げることは、飛沫帯の防食を兼ねて集中腐食の防止に非常に効果的である。



No.	カソード環境	アノード環境
1	セメント硬化体 (保り水: 水道水)	海水
2	セメント硬化体 (保り水: 水道水)	砂層 (海水飽和)
3	セメント硬化体 (保り水: 海水)	砂層 (海水飽和)

図-6.19 2層中鋼材の電位差

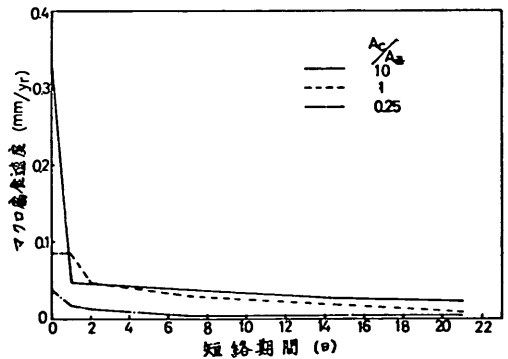


図-6.20 鋼材が海水とセメント硬化体に接するときのマクロ腐食速度の経日変化

(5) 鋼矢板の形状(突出部の大小)

鋼矢板は図-6.21に示すように打設されるため断面方向に凸面(海側へ凸)、凹面(陸側へ凸)および側面が生ずる。このためU形鋼矢板1組(凸矢板1枚、凹矢板1枚)では平坦面2面(凸面と凹面)と側面4面があり、凸面の表面積は鋼矢板1組(凸矢板と凹矢板)の表面積の約1/4に相当する。

鋼矢板構造物で M.L.W.L. を挟んで上下方向にマク

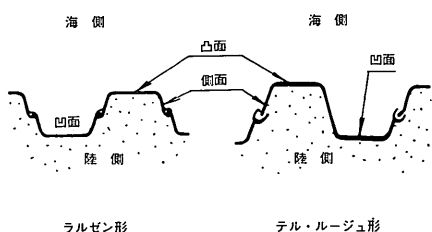


図-6.21 鋼矢板の形

腐食電池が発生するときマクロ腐食電池は凸面から流出しやすく、このため凸面に腐食が集中するものと考えられる。したがって全表面積に対して凸面の表面の占める割合の小さいほど、すなわち突出の著しいほど突出部から流出するマクロ腐食電流密度は大きくなる。この結果断面方向に突起のない円形材（鋼管杭など）に比べて鋼矢板では同一条件下であっても数倍大きい集中腐食が発生することになる。事実淡水が流入して淡水と海水が層を成す環境（東京港豊海埠頭）を除いて調査鋼管杭では集中腐食は発生していない。これに反して突出の著しい山形鋼、溝形鋼などでは集中腐食の発生が鋼矢板に比べて一層顕著である。また鋼矢板では同じ延長上にラル

ゼンⅠ形とラルゼンⅡa形が同一条件で使用された場合ラルゼンⅡa形の方が集中腐食がひどくてラルゼンⅠ形のところより早く補修された例がある²⁶⁾。これは凸面の表面積/全表面積の比がラルゼンⅠ形の1/3.06に対してラルゼンⅡa形では1/4.48となるため約1.5倍ラルゼンⅡa形の方が集中腐食が大きかったのではないかと推測される。

(6) 裏込み材の種類（残留水位変動の有無）

鋼矢板構造物では矢板背後に詰める裏込み材として一般に砂が使用される。鋼矢板の爪は1~2mmのすき間

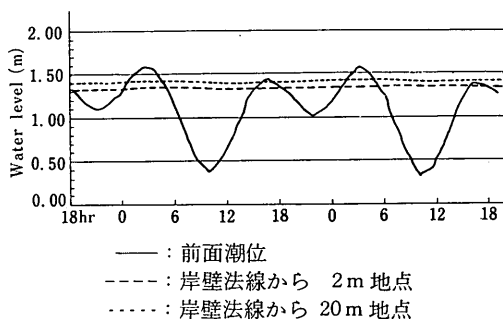


図-6.22 岸壁における残留水位測定結果の1例

表-6.5 鋼矢板構造物腐食傾向の発生条件

No.	腐食傾向	水 深 (m)	潮位差の有無	淡水の有無	コンクリート被覆深度	残留水位の変動	裏込み材	発 生 例
①	(a)	<-4	有	無	M. S. L. 上	無	(砂)	有
②	(a)		有	有	M. S. L. 上	無	(砂)	有 (-5m 以深の例は未調査)
③	(b)	-4~-5	有	無	M. S. L. 上	無	(砂)	有
④	(b)~(c)		有	有	M. S. L. 下*	無	(砂)	有 ((c) の例は未調査)
⑤	(c)	>-5	有	無	M. S. L. 上	無	(砂)	有
⑥	(c)		有	無	M. S. L. 下*	無	(砂)	有
⑦	(c)		無			無	(砂)	有
⑧	(d)	干潮時海泥面露出	有		M. S. L. 上	有	砂	有
⑨	(e)	<-4	有	無	M. S. L. 上	有	(割石)	
⑩	(e)		有	有	M. S. L. 上	有	(割石)	無

- 注 1) 空欄は特に制限なし。
 2) 淡水の有は、成層のとき該当する腐食傾向が発生しやすい。
 3) コンクリート被覆深度は海側。
 4) 発生例無は、集中腐食の発生が推定されるが未調査のもの。
 5) () は、() 内の条件の方が該当する腐食傾向の発生に適すると予想される。
 6) * 平均潮面下のときは腐食傾向(c)が発生しやすい。
 7) 表-7.1の категория 数量の使用により、任意の設計条件下の腐食傾向が推定可能。

があることになっているが、実際に打込むと爪の中に土砂がはいり込んで爪のすき間を埋めて鋼矢板はしっかりと噛み合う。残留水位を測定してみると図-6.22に示すように水位の変動はほとんどなく、この傾向は裏込め材が砂のとき経年とともに著しい³⁵⁾。残留水位の変動が小さい場合鋼矢板陸側面に発生するマクロ腐食電池のカソード域は残留水位上の湿っている狭い範囲であるのに対して、アノード域は残留水位下であるから A_c/A_a の値は非常に小さくなる。この結果陸測に対して凸面(図-6.21の凹面)にはほとんど集中腐食は発生しないことになる。いっぽう表-6.1では裏込め材が割石のときは矢板凹面にも陸側から腐食が集中して腐食傾向(e)が発生している。これは矢板噛合部の噛合せが不十分なためかそれとも裏込め材が割石のために矢板爪部の目地詰め作用が不十分となり、残留水位が矢板前面海水に対応して上下動してマクロ腐食電池のカソード域を大きく確保したためではないかと考えられる。また干潮時に海底面が露出する2例のうちの1例に残留水位下の凹面に腐食が集中して鋼矢板腐食傾向(d)が発生したが、これも残留水位の変動に関連するものと思われる。

以上のことから鋼矢板腐食傾向の発生条件と発生例の有無をまとめてみると表-6.5のようになる。

6.4 鋼管杭構造物の腐食傾向の発生条件

40年以前より使用されている鋼矢板に対して鋼管杭は10数年前から港湾で多く使用され始めたが比較的深度水深での使用例が多く集中腐食はほとんど発生していない。これは水深が深いケースが多いことの外鋼管杭の断面が円形であるため凹、凸面のある鋼矢板より集中腐食が発生しにくいことにもよる。しかし表-6.5の②の条件(潮位差があり、淡水が存在し、コンクリート被覆深度がM.S.L.上)のときには鋼管杭でもM.L.W.L.直下に集中腐食が発生する懸念がある。河口において鋼管杭に集中腐食が発生したものに東京港豊海埠頭の例がある²⁷⁾(図-5.13参照)。以上のように鋼管杭では淡水が流入して淡水と海水が層を成すとき見掛けの A_c/A_a が大きくなるため集中腐食が発生することになる。なお鋼管杭構造物では裏込め材を使用しないため鋼矢板腐食傾向(d)、(e)に相当する腐食傾向はない。

この外防砂堤鋼矢板にみられるサンドエロージョンの現象は鋼管杭についても予想される。

6.5 閘・水門施設の腐食傾向の発生条件

閘・水門施設では各部材のM.L.W.L.直下のエッジ

部に集中腐食が発生した。鋼矢板の凸面を門扉・スクリーン各部材の幅、鋼矢板の側面と凹面を各部材の肉厚とみなすと閘・水門施設の集中腐食の現象も鋼矢板の集中腐食の発生条件で説明される。ただし山形鋼、溝形鋼など断面方向の突出の著しい部材では同じ環境条件下でも突出程度に応じて集中腐食量は鋼矢板より著しい。例えば溝形鋼のエッジ部の集中腐食速度が数mm/yrにもなったケースがある。また閘・水門施設では鋼矢板構造物のように裏込め材を使用しないため鋼矢板腐食傾向(d)、(e)に相当する腐食傾向はない。

この外門扉のジェットパイプやスクリーンの丸鋼棒では漂流物に覆われた個所に腐食が集中し、また門扉のジェットパイプの下部では堆積泥に埋設した個所に腐食が集中した。これは漂流物に覆われた個所や堆積泥に埋設した個所がそれぞれアノード、裸鋼材部分がカソードとなったマクロ腐食電池による。

7. 集中腐食対策に関する提案と実施状況

海中構造物の腐食対策としては腐食しろによる方法、電気防食法、被覆材による方法、耐食鋼を使用する方法などがあるが、これらはマイクロ腐食を対象として適用されている。これに対して5章に示す腐食調査結果によれば海中構造物ではH.W.L.直上部(飛沫帯)とM.L.W.L.直下付近(または残留水位直下付近)の腐食量が大きいケースがある。特に後者では鋼構造物の環境条件によっては集中腐食量が飛沫帯の腐食量を上廻り、また深度方向と断面方向が限られた特定個所に腐食が集中するため集中腐食は鋼構造物にとっては極めて危険である。さらに集中腐食の発生個所は飛沫帯に比べて普通には肉眼で観察しにくくまた補修もむずかしいところでもある。したがって海中構造物の建設、海洋開発の推進のためには早急に集中腐食対策を確立する必要がある。

いっぽう海中構造物の調査結果に基づいてH.W.L.下の集中腐食の大小によって構造物の腐食傾向が分類でき、また集中腐食の発生は構造物の環境条件によって影響を受けることがわかった。この結果構造物を集中腐食の発生しにくい環境条件とすることも集中腐食対策の一つである。しかしこの方面の資料がないため本報では構造物の腐食傾向および腐食傾向の発生条件からみた集中腐食対策を提案した。さらに提案した集中腐食対策の指針化を計りまた対策を現地において実施した。(なお、「鋼矢板構造物の防食法」については、昭和45年に国有特許として出願し、特許第804894号として権利が確定

表-7.1 カテゴリー数量

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量		アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量	
		次元-1	次元-2			次元-1	次元-2
1	1	0.0	0.0	7	1	0.0	0.0
	2	-0.07002	0.12278		2	-0.03697	0.05353
	3	-0.13255	-0.04758		3	-0.11215	0.02545
2	1	0.0	0.0	8	1	0.0	0.0
	2	0.01476	-0.03571		2	-0.04951	-0.05437
	3	0.03259	0.05010	9	1	0.0	0.0
3	1	0.0	0.0		2	-0.00094	0.02360
	2	0.00047	-0.00186	10	1	0.0	0.0
4	1	0.0	0.0		2	-0.02385	-0.06535
	2	-0.03450	0.01521		3	-0.00805	-0.08545
5	1	0.0	0.0	11	1	0.0	0.0
	2	0.04743	-0.14332		2	-0.00123	-0.07042
	3	-0.01103	-0.01682	12	1	0.0	0.0
	4	-0.07593	-0.04291		2	-0.03016	0.02197
	5	-0.03934	-0.09841		3	0.01938	0.03552
	6	-0.04301	-0.11685		4	-0.03485	0.16654
6	1	0.0	0.0		5	0.01303	0.00602
	2	-0.01609	-0.03921		6	-0.03856	-0.02643
	3	-0.06105	-0.05561	7	-0.05305	-0.04330	
				8	0.00317	-0.05825	

しており、港湾技術研究所において実施許諾の用意がある。）

7.1 集中腐食発生程度の予測

与えられた環境条件下で発生する鋼構造物の腐食傾向が推定されるならば構造物を設計するときに適切な腐食対策の選定が可能となる。これに対して要因分析は算出したカテゴリー数量を使って外的基準が推定できる特長があるため、前述(6.1)の鋼矢板構造物の腐食傾向に対する要因効果の際に求めたカテゴリー数量を使って鋼矢板構造物の腐食傾向の推定を試みた。

求めたカテゴリー数量(x_{jk})を表-7.1注1)に示す。各サンプルの得点注2)はそれぞれの属するカテゴリー数量の一次の和として求められるので、表-7.1のカテゴリー数量を用いて調査80サンプルの分布を算出すると図-7.

注1) 表-7.1のアイテム、カテゴリーは表-6.4に示すもので、カテゴリー数量は数量化理論第2類の外的基準が3分類(腐食傾向(a), (b), (c))のケースとして求められた。

注2) サンプルの得点はサンプルに与える数値ともいわれこれが該当するカテゴリーのときの推定値である。

1, 図-7.2のようになる。図-7.1では得点が-0.2323より負方向となるほど腐食傾向(c)が発生しやすく、反対に得点が-0.2323より大きいところ、すなわち右側では腐食傾向(b), (a)が発生し右側に行くほど腐食傾向(a)が発生しやすい。また図-7.2では得点が負方向

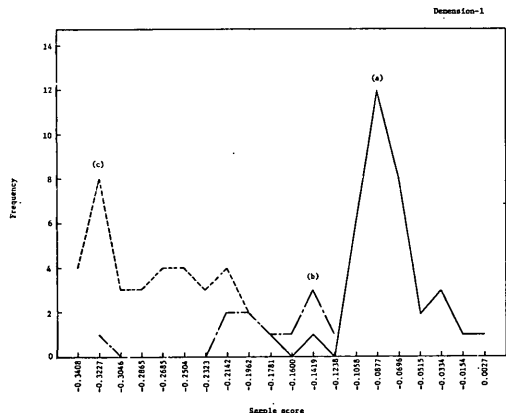


図-7.1 腐食傾向分析得点分布

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

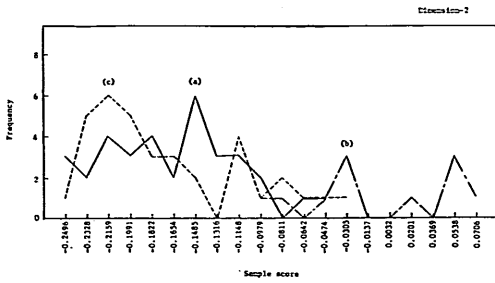


図-7.2 腐食傾向分析得点分布

(左側)となるほど腐食傾向(a), (c)が発生しやすく得点が正方向(右側)となるほど腐食傾向(b)が発生しやすい。この結果 図-7.1は集中腐食が発生するかしないか(すなわち腐食傾向(a), (b)か(c)か)の判別に使用でき, 図-7.2は腐食傾向(a)か(b), または(b)か(c)の判別に使用できる。

80 サンプルについて実測の腐食傾向と推定した腐食傾向を比較してみると表-7.2のようになる。なお表-7.2には推定した腐食傾向が3通り(推定1, 推定2, 推定3)示してある。推定1は表-7.1のカテゴリー数量

表-7.2 鋼矢板腐食傾向の推定例

サンプル No.	腐食傾向				サンプル No.	腐食傾向				サンプル No.	腐食傾向			
	実測	推定1	推定2	推定3		実測	推定1	推定2	推定3		実測	推定1	推定2	推定3
1	a	a	a	a, b	28	a	a	a	a, b	55	a	a	a	a, b
2	c	c	c	c	29	a	a	a	a, b	56	a	a	a	a, b
3	c	c	c	c	30	a	a	a	a, b	57	c	c	c	c
4	b	b	b	a, b	31	b	b(c)	b	a, b	58	c	c	a	c
5	a	a	a	a, b	32	c	b(c)	b	a, b	59	a	a	b	c
6	a	a	a	a, b	33	a	a	a	a, b	60	c	c	c	c
7	a	a	a	a, b	34	b	b, a	a	a, b	61	c	c	c	c
8	a	a	a	a, b	35	c	c	c	c	62	b	b	c	c
9	a	a	a	a, b	36	b	b	a	a, b	63	a	a	a	a, b
10	a	a	a	a, b	37	c	c	c	c	64	c	c	c	c
11	a	a	a	a, b	38	c	c	c	c	65	c	c	c	c
12	a	a	a	a, b	39	c	c	c	c	66	c	c	c	c
13	a	a	a	a, b	40	c	c	b	c	67	a	a	a	a, b
14	a	a	b	a, b	41	c	c	b	c	68	a	a	b	a, b
15	c	c	c	c	42	c	c	c	c	69	c	c	c	c
16	c	c	c	c	43	c	c	c	c	70	a	a	b	a, b
17	c	c	c	c	44	c	c	c	c	71	b	a	b	a, b
18	a	a	a	a	45	c	c	c	c	72	a	a	a	a, b
19	c	c	c	c	46	b	b	b	a, b	73	a	a	a	a, b
20	c	c	c	c	47	b	b	b	a, b	74	a	a	a	a, b
21	c	c	c	c	48	c	c	b	c	75	c	c	c	c
22	c	c	c	c	49	b	b	b	a, b	76	c	c	c	c
23	b	b(a)	b	a, b	50	a	a	a	a, b	77	c	c	b	c
24	c	c	c	c	51	a	a	a	a, b	78	c	c	c	c
25	b	b	b	a, b	52	a	a	a	a, b	79	c	c	c	c
26	a	a	a	a, b	53	a	a	a	a, b	80	a	a	a	a, b
27	a	a	a	a, b	54	a	a	a	a, b					

推定1: 要因分析(外的基準が3(a, b, c))による

推定2: 表-6.5による

推定3: 要因分析(外的基準が2(集中腐食が発生する場合a, bと発生しない場合c))による

を用いて推定した腐食傾向^注)である。表-7.2でサンプル No. 23, 31, 32, 24 の4個所は2通りの腐食傾向が示してある。例えばサンプル No. 23 の得点は -0.15548 (次元-1) と -0.05703 (次元-2) である。-0.15548 を図-7.1 に適用すると腐食傾向(a)か(b)が推定されるが -0.05703 を図-7.2 に適用しても腐食傾向(a)と(b)の判別がはっきりしない。しかし図-7.2では右側に行くほど腐食傾向(b)が発生しやすいので得点 -0.05703 での腐食傾向は(a)より(b)の方が発生しやすい。このことを表-7.2では b(a) と示した。ただしサンプル No. 34 のみは表-7.2で b, a と示してある。このことは得点が -0.15159 (次元-1), -0.08915 (次元-2) で図-7.1, 図-7.2 からは腐食傾向(a), (b)をはっきり判別できないためである。結局推定1では推定した腐食傾向が実測と異なるのはサンプル No. 32((c)を(b)と推定)と No. 71 ((b)を(a)と推定)の2個所であり、判別のはっきりしない No. 34 を含めると計3個となる。このときの誤差率は4%であるがサンプル No. 32, 71 とも腐食傾向をひどい方に((c)→(b), (b)→(a)) 推定することは腐食対策上安全側で実用上支障はない。

表-7.2の推定2は表-6.5に示す鋼矢板腐食傾向の発生条件に基づいて推定した腐食傾向である。推定2では推定した腐食傾向が実測と異なるのはサンプル No. 14, 32, 34, 36, 40, 41, 48, 58, 59, 62, 68, 70, 77 の計13個である。推定2の誤差率は16%で推定より判別の精度は劣るが、推定2の特長は簡便に腐食傾向が推定できることの外に推定ではサンプル数が少ないため推定できない腐食傾向(d), (e)発生が目安がつけられることであ

る。

推定3は外的基準を2分類(集中腐食が発生する=腐食傾向(a), (b)と発生しない=腐食傾向(c))として求めたカテゴリー-数量(付表-7.1, 付図-7.1)を用いて推定した腐食傾向である。したがって表-7.2の推定3で腐食傾向 a, b と示してあるのは腐食傾向(a)か(b)の集中腐食が発生することを意味する。推定3では推定した腐食傾向が実測と異なるのはサンプル No. 32, 59, 62 の3個で誤差率は4%である。

7.2 集中腐食発生条件からみた対策

集中腐食対策の一つに鋼構造物の環境条件を集中腐食が発生しにくい条件とする方法がある。鋼矢板構造物については表-6.5に示す鋼矢板腐食傾向の発生条件のうち集中腐食(腐食傾向(a), (b), (d), (e))の発生条件を集中腐食が発生しない、腐食傾向(c)の発生条件に変更する方法がある。この方法を表-7.3に示す。表-7.3の条件 No. は表-6.5の条件 No. に対応する。例えば条件 No. ①で発生する鋼矢板の腐食傾向(a)を腐食傾向(c)にする方法としては海側コンクリート被覆の M. S. L. 上を M. L. W. L. 下とする(方法1)か、または水深が -4 m 未満を -5 m 以深とする(方法2)の2通りあることを表-7.2では示している。

なお、表-7.3は集中腐食発生条件から考えられる集中腐食対策を単に列挙したものであるから、この中には水深を深くする方法や淡水の流入を避ける方法などのように現地では実現性のうすいものも含まれている。したがって、集中腐食発生条件からみた集中腐食対策を実施する際には表-7.3の中から最も経済的な方法を選択することは当然である。

鋼管杭構造物では鋼管杭の断面(外側)が円形であるため M. L. W. L. 直下の集中腐食は鋼矢板構造物に比べて発生しにくい。鋼管杭でも河口に位置した場合にはコンクリート被覆下端が M. S. L. 上であれば集中腐食が発生して腐食傾向は(a)となりやすい(表-6.5の条件 No. ②に相当する)。この場合にもコンクリート被覆を M. L. W. L. 下まで下げる方法が有効である。

山形鋼、溝形鋼など突出部を有する部材は鋼矢板に比べて M. L. W. L. 直下のエッジ部に集中腐食が発生しやすい。集中腐食による損傷を回避するには部材の外形を円形とする(例えば鋼管杭を使用する)方法がよい。

7.3 集中腐食個所に腐食量に見合った肉厚の鋼材を取付ける方法

腐食傾向の推定から鋼構造物に集中腐食の発生が予想

注) 表-7.1による推定例をサンプル No.1 について示す。

アイテム	カテゴリー	カテゴリー-数量 (次元-1)	カテゴリー-数量 (次元-2)
1	1	0.0	0.0
2	2	0.01476	-0.03571
3	2	0.00047	-0.00186
4	2	-0.03450	0.01521
5	1	0.0	0.0
6	2	-0.01609	-0.03921
7	1	0.0	0.0
8	1	0.0	0.0
9	2	-0.00094	0.02360
10	3	-0.00805	-0.08545
11	2	-0.00123	-0.07042
12	8	0.00317	-0.05825
計		-0.04241	-0.25209

次元-1のカテゴリー-数量の和 [-0.04241] を図-1.7に適用すると腐食傾向は(a)と推定される。

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

表-7.3 鋼矢板腐食傾向 (a), (b), (d), (e) を (c) にする方法

条件 No.	腐食傾向	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
①	(a)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	水深 <-4m>->-5m		
②	(a)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	淡水の有無 有→無 水深 <-4mのとき> >-5m		
③	(b)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	-4~-5m<->-5m		
④	(b)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.下→ M.L.W.L.下	淡水の有無 有→無 水深 <-4mのとき> >-5m		
⑧	(d)→(c)	陸側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	残留水位の変動 有→無		
⑨	(e)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下 陸側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下 残留水位の変動 有→無 裏込め材 割石→砂	水深 <-4m>->-5m 陸側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	水深 <-4m>->-5m 残留水位の変動 有→無 裏込め材 割石→砂
⑩	(e)→(c)	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下 陸側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	海側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下 残留水位の変動 有→無 裏込め材 割石→砂	淡水の有無 有→無 水深 <-4mのとき> >-5m 陸側コンクリート被覆 M.S.L.上→ M.L.W.L.下	淡水の有無 有→無 水深 <-4mのとき> >-5m 残留水位の変動 有→無 裏込め材 割石→砂

- 注 1) <-4m>->-5m は、-4m 以浅を -5m 以深にすることを示す。
 2) 水深は鋼矢板に付着した海泥面までの水深である。
 3) 淡水を無くするには、導流堤などで淡水が鋼矢板前面に流入しないようにする方法もある。
 4) コンクリート被覆は、十分なかぶりと入念な施工を必要とする。
 5) コンクリート被覆を M.L.W.L.(平均干潮面)まで下げる方法は、スプラッシュ・ゾーンの防食にも役立つ。

される場合には腐食傾向に応じて集中腐食個所に腐食量に見合った鋼材を取付ける方法が集中腐食対策として考えられる。使用鋼材を腐食量に見合った肉厚とする方法は従来から腐食しろによる方法として行なわれているが、腐食しろはマイクロ腐食速度で取られている現状であり集中腐食対策としての腐食しろはまだ考慮されていない。

したがって、ここに提案する方法は推定した腐食傾向に準拠して集中腐食個所の腐食しろを集中腐食速度で考

慮するものである。

(1) 集中腐食個所に腐食量に見合った鋼材片を取付ける方法

鋼材片を取付ける集中腐食個所は鋼矢板では図-5.2による。取付ける鋼材片の重量は集中腐食量として次式より算出する。

$$\text{集中腐食量} = \text{年間腐食量} \times \text{期待寿命年数}$$

例えば腐食傾向が (a) で集中腐食速度が 1.0 mm/yr の場合期待寿命年数を 20 年とすれば、集中腐食による

肉厚減量は $1.0 \text{ mm/yr} \times 20 \text{ yr} = 20 \text{ mm}$ となる。凸矢板 1 枚に取付ける鋼材片の重量は集中腐食個所を 20 cm (凸矢板平坦面の幅) $\times 30 \text{ cm}$ (深度方向の長さ) とすると $20(\text{mm}) \times 20(\text{cm}) \times 30(\text{cm}) \times 7.86(\text{g/cm}^3)$ $\approx 9.4(\text{kg})$ となる。

ただし、 $7.86(\text{g/cm}^3)$ は鋼材の密度である。

したがって、鋼矢板凸面の M.L.W.L. から下方 30 cm の範囲内に 9.4 kg の鋼材片を取付ければ、この鋼材片は犠牲陽極として働いて集中腐食量の肩代りをする。集中腐食はマクロ腐食電流によるものであるから取付け鋼材片の形状を工夫することによって集中腐食の進行状況の測定が容易になる。例えば既製品の不等辺山形鋼 ($A \times B \times t$) 片の B 面を鋼矢板面に接続させれば A 面は海水中に突出したかっこうとなるので測定しやすい。いま 20 年間に必要な 9.4 kg の鋼材片として不等辺山形鋼を使用するには、 $150 \times 100 \times 15(\text{mm})$ の 34 cm 長のもの 1 個または $150 \times 90 \times 15(\text{mm})$ の 36 cm 長のもの 1 個で済み A 面による集中腐食量の測定は約 12 年間可能となる。その外集中腐食量に見合うように各種形状・寸法の鋼材片を 1 個もしくは複数個組合せることによって、この方法は鋼矢板だけでなく鋼管杭などにも適用できる。

(2) 集中腐食が発生する鋼矢板の肉厚を厚くする方法

鋼材片取付けの代りに集中腐食量に相当する肉厚を加味した鋼矢板を集中腐食が発生する凸矢板 (腐食傾向 (a), (b)), 凹矢板 (腐食傾向 (d)), 凸, 凹矢板 (腐食傾向 (e)) に使用する方法がある。

例えば腐食傾向 (b) が発生するときは凸矢板に集中腐食に見合った肉厚の鋼矢板を使用する。M.L.W.L. 直下の肉厚減少速度を 0.15 mm/yr とすると 20 年間の肉厚減少量は 3 mm となる。鋼矢板の凹面の腐食速度を 0.05 mm/yr とすれば 20 年間の肉厚減少量は 1 mm となり、この値は鋼矢板の凹, 凸面に関係なく腐食する肉厚減少量であるから集中腐食の発生面 (凸面) に必要な肉厚の増量は $3 \text{ mm} - 1 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$ となる。一例として JIS 規格形 U 矢板 II 形の肉厚は 10.5 mm , 同 III 形の肉厚は 13.0 mm であって、鋼矢板構造物の設計強度に基づいて II 形鋼矢板を使用するときには凸矢板に III 形鋼矢板を用いれば III 形と II 形の肉厚の差は $13.0 \text{ mm} - 10.5 \text{ mm} = 2.5 \text{ mm}$ あるから十分に期待寿命を確保できる。

(3) 使用鋼矢板の形を大きくする方法

例えば (2) の例の腐食傾向 (b) が発生するとき凸矢板だけでなく凹矢板にも III 形鋼矢板を使用する方法があ

る。これは (2) の方法の変形であるが (2) の方法より鋼矢板の打込みが容易な場合にはこの方法が適用できる。

7.4 港湾鋼構造物設計指針への適用

港湾構造物を設計する際のよりどころとして運輸省港湾局編の港湾構造物設計基準がある。これは昭和 42 年 4 月に発刊されて以来国直轄工事についてはもちろんのこと港湾管理者が行なう補助事業その他全ての港湾事業の設計業務について広く使用されてきた。いっぽう港湾法^{注1)}の改正により新たに第 56 条の 2 で港湾区域外の施設も含めて一定の港湾の施設は運輸省令^{注2)} で定める技術上の基準に適合するように建設し、改良し、また維持しなければならないことになった。このため港湾構造物設計基準は港湾構造物設計指針としてその後の研究成果を含めて昭和 51 年に改訂されることになった。設計基準の刊行当時は本研究は中途であったため鋼構造物の腐食速度や腐食対策は従来どおりのマイクロ腐食の立場からのもので僅かにマクロ腐食に関する中間報告の文献が紹介されたに過ぎなかった。今回発刊される設計指針では次のように本報の成果が取り入れられることになった。

(1) 鋼構造物の腐食傾向, 集中腐食速度, 腐食傾向の発生条件を示した。このような鋼構造物の腐食の実態を参照して設計者は設計条件における鋼構造物の腐食傾向 (集中腐食発生の有無) を推定し、腐食傾向に応じた腐食速度を取る。すなわち集中腐食が発生しないときまたは集中腐食が発生するケースでも集中腐食発生個所以外の鋼材面についてはマイクロ腐食速度を鋼材腐食速度とし得るが、集中腐食個所については集中腐食速度を適用する。なおマイクロ腐食速度 (片面) は H.W.L. 上 0.3 mm/yr , H.W.L. ~ 海底間 0.1 mm/yr , 海泥中 0.03 mm/yr , 残留水位上 0.03 mm/yr , 残留水位下 0.02 mm/yr とする。

(2) 集中腐食の発生が予想されるとき対策の一つとして鋼矢板構造物では表-7.3 を参照して腐食傾向 (a), (b), (d), (e) の条件を (c) の条件とする方法がある。なお表-7.3 では各ケースについて複数の方法 (例えば方法 1, 方法 2, 方法 3, 方法 4) が示してあるが、これはこの中から現地条件に最も適する方法が選択できることを意味する。

(3) また鋼矢板構造物では集中腐食個所に腐食量に見合った肉厚の鋼矢板を使用する方法もある。この方法では (i) 集中腐食が発生する鋼矢板のみ厚い肉厚の鋼矢板

注1) 昭和 48 年 7 月 7 日付法律第 54 号

注2) 昭和 49 年 7 月 16 日公布制定の運輸省令第 30 号

を使用する（例えば腐食傾向(a)の発生が予想される場合には凸矢板に凹矢板より厚い肉厚のものを使用する）場合と(2)集中腐食の発生個所に集中腐食量に見合った犠牲鉄板を取付ける場合がある。

(4) 鋼管杭構造物では鋼管杭の断面が円形であるため集中腐食は鋼矢板に比べて発生しにくい。ただし河口に位置した鋼管杭では腐食傾向が(a)となりやすい。この場合、コンクリート被覆をM.L.W.L.まで下げるかまたは犠牲鉄板を取付ける方法が簡便法としてある。

(5) 閘・水門施設では山形鋼、溝形鋼など突出部を有する部材ではエッジ部に集中腐食が発生しやすい。このため鋼管杭のような断面が円形の部材を使用するかまたは集中腐食個所のみ犠牲鉄板を付けるなどして断面を大きくすることは有効である。

7.5 集中腐食対策の実施状況

提案した集中腐食対策の実施状況は次のとおりである。

鋼矢板構造物

(1) 腐食傾向(a)(表-6.5の条件①に該当)を環境条件の変更によって腐食傾向(c)とすることに該当する例

尼崎港第一閘門の閘室の鋼矢板は水深が付図-7.2に示すように-4m未満の個所があったがコンクリート被覆をM.L.W.L.下(-0.7m)まで下げた結果、付図-7.3に示すように集中腐食の発生は見られなかった。

(2) 腐食傾向(b)(表-6.5の条件③に該当)を犠牲鋼材の取付けによって腐食傾向(c)とすることに該当する例

片上港同和鉱業第2けい船岸では設計水深が-4mで海側矢板面はコンクリート被覆が行なわれずむき出しのままであったため腐食傾向(a)または(b)の発生が予想される。これに対して+0.45mの海側矢板面に溝形鋼を写真-7.1のように取付けたところ溝形鋼が犠牲となって写真-7.2のようにひどく腐食したが、鋼矢板凸面には集中腐食はまったくみられず腐食傾向は(c)であった。なお+0.45mはM.L.W.L.直下に相当する。

(3) 腐食傾向(a)(表-6.5の条件①に該当)を条件変更と犠牲鋼材の取付けによって腐食傾向(c)とすることに該当する例

福島港-3.0m物揚場では水深が-4m以浅、コンクリート被覆深度がM.S.L.上などの条件のため腐食傾向(a)の発生が予想される。したがって写真-7.3に示すようにコンクリート被覆深度をM.S.L.下まで下げさら

に海側鋼矢板面に溝形鋼をL.W.L.付近に取付けたところ腐食傾向は(c)であった。

鋼管杭構造物

(1)腐食傾向(a)(表-6.5の条件②に相当)を条件変更によって腐食傾向(c)とすることに該当する例

東京港航海訓練所着船ドルフィンに鋼管杭の腐食傾向(a)(9mm厚の鋼管杭が10年未満で集中腐食のためM.L.W.L.直下で輪切り状となった)が発生した豊海水産埠頭に近接するため豊海水産埠頭と同じく鋼管杭に集中腐食の発生が予想される。このため付図-7.4~付図-7.5に示すようにコンクリート被覆をL.W.L.まで下げる対策がとられた。この結果写真-7.4に示すように集中腐食の発生が抑制されて鋼管杭の腐食傾向は(c)となった。なおこの場合のコンクリート被覆はヒューム管を鋼管杭に於いて両者の間にモルタルを注入したものである。コンクリート被覆深度をM.L.W.L.まで下げる方法は付図-7.6に示すように京浜港大黒船溜防波堤などでも実施されている。

(2) 水深が浅いときコンクリート被覆をM.L.W.L.下まで下げることに該当する例

鋼管杭は断面が円形であるため鋼矢板に比べて集中腐食は発生しにくく、鋼管杭に集中腐食が発生した例は淡水が存在したときのみである。須磨船積棧橋は水深が-2~-5mと浅い個所があり、コンクリート被覆を-0.5mまで下げたところ集中腐食はまったく発生しなかった。

閘・水門施設

尼崎港第一閘門一次スクリーンでは山形鋼、溝形鋼の代りに断面方向にエッジ部を持たない丸鋼棒が使用された。写真-7.5に丸鋼棒の使用状況を示す。

8. 結 論

鋼構造物の腐食と鋼材片の腐食の区別を明らかにするため長尺鋼材に発生する環境差による腐食をマクロ腐食、単一環境における鋼材片の腐食をマイクロ腐食と区別し、マクロ腐食の立場から海中構造物の腐食調査を行なった。調査の結果海中構造物では集中腐食が発生し短期間で構造物の損傷が著しいケースのあることがわかったが集中腐食の現象はマイクロ腐食では説明ができない。すなわち海水中のマイクロ腐食速度は0.1mm/yr(片面)であるが集中腐食速度は1mm/yrまたはこれ以上となり、また集中腐食の発生は特定個所にのみ限られる。これに対して鋼構造物の腐食しるはマイクロ腐食速度でとられて

おり腐食対策もミクロ腐食の立場で考えられている。またマクロ腐食の立場からの鋼構造物の腐食調査法がなくこのため海中構造物の腐食の実態が把握されていない。この外腐食試験結果はそれぞれ個別に示されているのみで腐食試験結果から構造物の設計に反映できる意見の抽出作業は行なわれていないなどの現状である。

したがって本報では海中構造物の腐食の実態を示しこれに基づいて構造物に発生する集中腐食の発生機構、集中腐食の発生状況からの構造物の腐食傾向の分類、腐食傾向の発生条件、腐食傾向の推定、マクロ腐食の立場からの集中腐食対策などの検討、検討結果の指針化および現地構造物への適用を行なった。この結果本研究の範囲内で次のことがいえる。

(1) 日本の港湾における鋼矢板構造物の腐食傾向は H.W.L. 下の腐食状況により (a), (b), (c), (d), (e) の 5 通りに分類できる (図-5.2 参照)。

腐食傾向 (a)

M.L.W.L. 直下付近の凸面にのみ腐食が集中して腐食速度 (両面=海側+陸側) は 0.5~1.0 mm/yr と大きく II 形相当の鋼矢板では 10 数年未満で穴があくことになるが、さらに深度が下がるにつれて凸面の腐食速度は急減して 0.1 mm/yr 以下となる。いっぽう鋼矢板の凹面、側面の腐食速度は深度方向によって大差なく 0.1 mm/yr 以下である。

腐食傾向 (b)

鋼矢板凸面では M.L.W.L. 直下付近の腐食速度は 0.1~0.2 mm/yr と大きい深度が下がるにつれて腐食速度は漸減して行き 0.1 mm/yr 以下となる。これに対して凹面、側面では腐食速度は深度によってあまり変化なく 0.1 mm/yr 以下である。

腐食傾向 (c)

鋼矢板の腐食速度は断面方向、深度方向によって大差なく凸面、凹面、側面とも 0.1 mm/yr 以下である。

腐食傾向 (d)

残留水位直下付近の凹面に腐食が集中して腐食速度は約 0.8 mm/yr と大きく II 形相当品の鋼矢板では 10 数年未満で穴があくが、さらに深度が下ると腐食速度は急減する。いっぽう凸面、側面では腐食の集中は見られない。

腐食傾向 (e)

M.L.W.L. 直下付近の凸面と凹面に腐食が集中して腐食速度は 0.5~1.0 mm/yr と大きくちょうど腐食傾向 (a) の腐食現象が凹面にも発生したかっこうである。い

っぽう側面には集中腐食の発生は見られない。

(2) 鋼管杭構造物で H.W.L. も下の腐食状況によって (a), (b), (c) の 3 通りに分類できる。

腐食傾向 (a)

鋼管杭の M.L.W.L. 直下部に集中腐食が発生し腐食速度 (両面=外面+内面) は 0.8 mm/yr 以上となるがさらに深度が下ると腐食速度は急減して 0.1 mm/yr 以下となる (図-5.13 参照)。

腐食傾向 (b)

M.L.W.L. 直下部の腐食速度が 0.2 mm/yr 前後と腐食傾向 (a), (c) の中間の値を示すさらに深度が下ると腐食速度は 0.1 mm/yr 以下となる。

腐食傾向 (c)

M.L.W.L. 直下部に集中腐食が発生せず H.W.L. 下の腐食速度は 0.1 mm/yr 以下である。

(3) 閘・水門施設では M.L.W.L. 直下付近の突出部 (スキンプレート、山形鋼、溝形鋼の縁) に集中腐食が発生する傾向がある。このような部材の縁に発生する集中腐食速度片面は大きく数 mm/yr を越す場合もある。また閘・水門の門扉に取付けてあるジェットパイプでは漂流物や堆積泥で覆われた個所に腐食が集中して数年未満で 4.5 mm のパイプに穴があいた。鋼矢板の腐食傾向 (a) で鋼矢板凹面、側面の腐食速度は小さく深度方向による差があまりないことは閘・水門の門扉、スクリーン各部材の肉厚減少の傾向に類似している。したがって、腐食傾向 (a) が発生する鋼矢板の凸面が門扉、スクリーン部材の幅と考え、鋼矢板の凹面、側面が門扉、スクリーン部材の肉厚と考えると閘・水門施設の腐食傾向は鋼矢板構造物の腐食傾向に類似していることがわかる。

(4) H.W.L. 直上部は飛沫帯と呼ばれ腐食の激しい環境といわれるが海中構造物の H.W.L. 直上部では穴が発生したケースと穴が発生しなかったケースがある。穴が発生したケースでも構造物全面に穴が発生するのではなくて鋼矢板の場合多いときで全矢板の 10~20% 程度、少ないときで 1~2 枚の矢板面に穴があき、穴の発生個所の腐食速度は 0.26~0.53 mm/yr であるが穴が発生しない個所の腐食速度は 0.1 mm/yr 程度である。いっぽう穴が発生しなかったケースでは H.W.L. 直上部の腐食速度は 0.1 mm/yr 以下と小さい。鋼管杭では直上部の腐食速度は 0.2~0.4 mm/yr であった。

(5) 鋼矢板構造物では H.W.L. 下の腐食状況によって (a)~(e) 5 通りの腐食傾向に分類されたが

H. W. L. 下の腐食傾向は H. W. L. 上の腐食状況とは特に関係はない。このことはマクロ腐食による集中腐食の現象は H. W. L. 下でしか発生しないことを示している。

(6) タイロッドはジュート被覆が塗装されたケースが多かったがいずれも腐食速度は無視し得る程度であった。また裸タイロッドの場合も一般の港湾環境では腐食による損傷はあまりなかった。この外タイロッド固定用金具(座金およびナット)がタイロッドよりはずれていとき腐食が著しいが、タイロッドに接続していた固定用金具には発錆はほとんど見られなかった。このような現象は鋼構造物の腐食機構に関連するものと思われる。

(7) 鋼矢板の腐食傾向(a), (b), (d), (e)に見られる集中腐食の現象はミクロ腐食からは説明し難い。検討の結果このような集中腐食の現象はマクロ腐食の立場から説明できることがわかった。すなわち腐食傾向(a), (b), (e)では M. L. W. L. 直上部(湿っている範囲)がカソード, M. L. W. L. 下がアノードとなるマクロ腐食電池が発生し, 腐食傾向(d)では残留水位面上(湿っている範囲)がカソード, 残留水位面下がアノードとなるマクロ腐食電池が発生する。マクロ腐食に関する実験の結果マクロ腐食電池の電位差は長期間継続する, マクロ腐食速度は A_c/A_a (カソード, アノード表面積比)に比例する, マクロ腐食電流はアノードの突出部から流出しやすい, 環境比抵抗が大きくなるとマクロ腐食電流は界面付近のアノードから流出する傾向があり, この傾向は数 100~1,000 Ω -cm で特に著しい, マクロ腐食電池のカソードが裸鋼材のときよりセメント硬化体で被覆されたときの方がマクロ腐食電流の発生が少ないなどのことがわかった。いっぽう 83 例の鋼矢板構造物調査結果について構造物の腐食傾向と環境条件との関係を検討してみると腐食傾向に影響する要因としては潮位差の有無, 水深の大小, 淡水の有無, 上部コンクリートの被覆深度, 鋼材の形状(突出部の大小)裏込め材の種類, 残留水位の変動などが考えられる。マクロ腐食の発生傾向に基づいて集中腐食の発生因を考察すると集中腐食はマクロ腐食が発生しやすい条件のときに発生すると説明でき, また鋼矢板構造物の腐食傾向の発生因ともこのことは矛盾しないことがわかった。

(8) 鋼矢板構造物の腐食傾向に影響する要因に基づいて腐食傾向(a), (b), (c), (d), (e)が発生しやすい環境条件を示した(表-6.5 参照)。鋼管杭では表-6.5 の②の条件で残留水位の変動と裏込め材の種類を除いた条件, すなわち潮位差が有り, 淡水の流入(特に淡

水と海水が層を成すとき), コンクリート被覆深度が M. S. L. 上のときに集中腐食(鋼管杭の腐食傾向(a))が発生しやすい。また閘・水門施設では部材のエッジ部に集中腐食が発生するがこの場合には水深, 潮位差の有無, コンクリート被覆深度, 淡水の有無, 鋼材の形状などが要因となる。

(9) タイロッドが残留水位面の上下にまたがるとき A_c/A_a (A_c : カソード表面積=残留水位上の鋼材表面積, A_a : アノード表面積=残留水位下の鋼材表面積)が大きいほど集中腐食が著しくなる。しかしタイロッドは鋼矢板に接続されるため残留水位面下の鋼矢板面が A_a として加わって A_c/A_a が非常に小さくなる。したがってタイロッドが集中腐食で損傷を受けるのはタイロッドと鋼矢板との電気的接続が悪くタイロッドが傾斜していて残留水位の上下にまたがるときに限られる。

(10) 鋼矢板の腐食傾向(a), (b), (c)の推定は要因分析(数量化理論第2類, 外的基準が3分類のケース)で求めたカテゴリー数量を用いれば可能なことがわかった(表-7.1, 図-7.1, 2 参照)。この場合の誤差率〔(推定が間違えたサンプル数/サンプル数)×100〕は4%であったが推定を間違えたケースはいずれも(c)を(b), (b)を(a)というように実態より集中腐食がひどいように推定した。これは鋼構造物の腐食対策の選定に対しては安全側となるので本報に示す腐食傾向の推定法は実用上何ら支障はないものと考えられる。

腐食傾向の簡易推定法としては表-6.5に示す腐食傾向の発生条件を参照する方法がある。この方法は誤差率が16%で要因分析による方法に比べて多少推定の精度が劣るが表-6.5を参照するだけで直ちに腐食傾向の一応の見当がつくので非常に簡便であり, また, サンプル数が少なくて要因分析法では推定できない腐食傾向(d), (e)の推定にも使える利点がある。

(11) 腐食傾向の推定により実態に則した鋼構造物の腐食しろが取得する。すなわち集中腐食の発生が推定されないとき(腐食傾向が(c)のとき)の鋼構造物の全面または集中腐食の発生が推定されても集中腐食個所以外の鋼材面(例えば腐食傾向(a)のときの M. L. W. L. 直下凸面以外の鋼矢板面など)についてはミクロ腐食速度(片面)(海水中 0.1 mm/yr, 海泥中 0.03 mm/yr, 残留水位上 0.03 mm/yr, 残留水位下 0.02 mm/yr)を用いて腐食しろが算出できる。これに対して集中腐食の発生が推定されるとき集中腐食個所(例えば腐食傾向(a)のときの M. L. W. L. 直下の鋼矢板凸面など)の腐

食しらは推定した鋼構造物の腐食傾向に基づく集中腐食速度を適用する。なお H. W. L. 直上部 (飛沫帯) の腐食しらは H. W. L. 下の腐食傾向に関係なくマイクロ腐食速度 (片面) (0.30 mm/yr) を適用して算出する。

(12) 鋼矢板構造物の集中腐食対策の一つに集中腐食が発生する腐食傾向 (a), (b), (d), (e) の発生条件を集中腐食が発生しない腐食傾向 (c) の発生条件に変える方法がある。この方法を表-7.3 に示すように提案した。

鋼管杭では表-6.5 の②の条件のときに集中腐食が発生しやすいがこの場合にもコンクリート被覆を M. L. W. L. 下まで下げる方法が有効である。山形鋼、溝形鋼など突出部を有する部材は断面を円形として (例えば鋼管杭を使用する) 突出部をなくすことがまず必要である。またタイロッドではタイロッドと鋼矢板との電気的接続を確実にすれば集中腐食の発生が回避できる。

(13) また集中腐食の対策として、集中腐食個所に腐食量に見合った肉厚の鋼材片を取付ける方法もある。まず構造物の腐食傾向を推定して集中腐食の発生の有無、集中腐食個所および集中腐食速度を知り、次に集中腐食個所に集中腐食量に見合った鋼材片を取付ける。なお鋼矢板構造物の場合には集中腐食量に見合う肉厚の鋼矢板を全面または集中腐食発生矢板 (例えば腐食傾向が (a) の場合には凸矢板) に使用する方法もある。

(14) マクロ腐食の立場からの海中構造物の腐食調査法 (超音波式厚み計 (水中用) による非破壊調査と引抜きまたは切り取り鋼材について測定する破壊調査を含む) を提案したが、提案した調査法で海中構造物の腐食の実態を把握する資料の入手は可能であることがわかった。この外鋼構造物の腐食傾向を観察によって判別する簡易調査法を提案したがこの方法は現地の都合で定量的な調査が不可能な場合には簡易法として十分役立つことがわかった。

(15) 腐食調査データの解析手法として数量化理論 (第2類) を適用したが、この手法は鋼矢板構造物の腐食傾向に影響する要因の考察および腐食傾向の推定に役立った。さらに要因分析の外的基準を質で与えることによって観察による定性的調査データが計測器による定量的調査と同じように利用できるため、提案した簡易腐食調査法の実用性が増し腐食調査法の範囲を一層拡大することができた。

(16) 鋼構造物の腐食傾向、集中腐食速度、腐食傾向の発生条件、マクロ腐食の立場からの集中腐食対策など

の本研究の成果が昭和51年改訂の港湾構造物設計指針に取入れられることになった。

(17) 提案した集中腐食対策が鋼矢板構造物、鋼管杭構造物、閘・水門施設に適用されたが、良好な腐食対策の効果を示した。 (1976年6月30日受付)

参 考 文 献

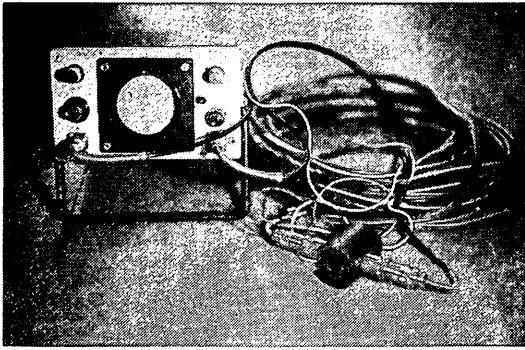
- 1) 伊藤伍郎：腐食科学と防食技術，コロナ社，35(1971) (Evans, U. R. : Jr. Inst. Metals, 30. 239 (1923))
- 2) Humble, H. A. : The Cathodic Protection of Steel Piling in Sea Water, Corrosion, 5, No. 9. 292 (1949)
- 3) Morton, B. B. : Splash Zone Protection for Off-shore Structures, World Oil, 144, No. 1, 125 (1957)
- 4) LaQue, F. L. : Effects of Specimen Size on Results of Corrosion Tests, The 5th International Congress on Metallic Corrosion (1972) (小林大訳：防食技術，21, No. 12, 55~562 (1972))
- 5) Larrabee, C. P. : Corrosion-Resistant Experimental Steels for Marine Applications, Corrosion, 14, No. 11, 501 t (1958)
- 6) Arup, H. H. & Glantz, G. : An Evaluation of Corrosion of Sheet Steel Piling in Danish Harbors, Proceeding of the Second International Congress on Metallic Corrosion, 767~770 (1963)
- 7) Lattin, B. C. : Steel Piling in Sea Water, Reprinted from Consulting, Engineer, June (1958)
- 8) Akimov, G. V. : Theory and Research Methods of Metallic Corrosion, Corrosion, 14, No. 10, 463 t ~483 t (1958)
- 9) Tomashov, N. D. & Mikhailovsky, Y. N. : Corrosivity of Soil Corroion, Corrosion, 15, No. 2, 77 t (1959)
- 10) Sudrabin, L. P. : Foundation Piling Corrosion : Mechanisms & Cathodic Protection, Mater. Prot., 2, No. 10, 54~64 (1963)
- 11) Schashl, E. & Marsh, G. A. : Some New Views on Soil Corrosion, Mater. Prot., 2, No. 11, 8~17 (1963)
- 12) Kennedy, E. R. & Wilson, J. S. : New York Harbor Corrosion, Mater. Prot., 6, No. 1, 53 (1967)
- 13) Larrabee, C. P. : Steel Has Low Corrosion Rate During Long Sea Water Exposure, Mater. Prot., 1, No. 12, 95~96 (1962)
- 14) 善 一章：港湾における鋼材腐食の研究 (第8報) 鋼矢板構造物の腐食(2), 防食技術, 22, No. 10/11, 428~434 (1973)
- 15) 善 一章：港湾における鋼材腐食の研究 (第7報) 閘, 水門施設の腐食傾向, 防食技術, 22, No. 2, 55~63 (1973)
- 16) 善 一章：港湾における鋼材腐食の研究 (第2報)

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

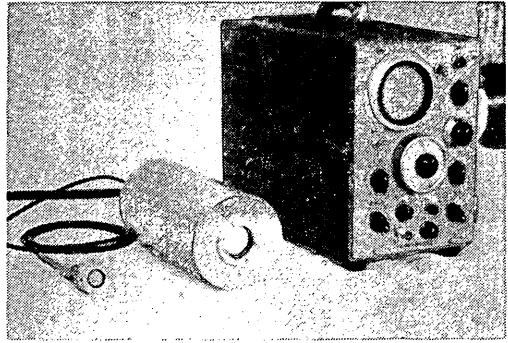
- 港湾鋼構造物の腐食調査法および広畑港, 大阪港における鋼矢板腐食速度, 防食技術, 18, No. 5, 8~15 (1969)
- 17) 例えば, 運研・港湾施設部: 港湾における鋼矢板の腐食状況について, 1~14 (1953)
- 18) 渡部弥作: 改訂港湾工学, コロナ社, 149, (1968)
- 19) 八幡製鉄KK・市場部: 鋼矢板厚さ測定器の現場測定調査報告書, 18 (1963)
- 20) 富士製鉄KK・釜石製鉄所: 南棧橋鋼矢板腐食状況調査報告. 1~8 (1966)
- 21) 八幡製鉄KK: 大野川護岸鋼矢板腐食量調査報告書 1~8 (1965)
- 22) 善 一章: 港湾における鋼材腐食の研究(第1報) 腐食速度推定法に関する研究, 港研報告, 5, No. 8, 69 (1966)
- 23) Fritts, C. J.: Corrosion Control on Offshore Drilling and Producing Equipment, Corrosion, 11, No. 11, 472 (1955)
- 24) Ross, C. W.: Deterioration of Steel Sheet Pile Groins at Palm Beach, Florida, Corrosion, 5, No. 10, 339~342 (1949)
- 25) Brouillette, C. V. & Hanna, A. E.: A Survey of Sheet Steel Piling Corrosion, Mater. Prot., 6, No. 11, 24~27 (1967)
- 26) 善 一章: 港湾における既設鋼構造物の腐食に関する研究, 港研報告, 12, No. 1, 141~194 (1973)
- 27) 善 一章: 海中構造物腐食の実態と対策, 鹿島出版会, 1~194 (1974)
- 28) Southwell, C. R. & Alexander, A. L.: Structural Ferrous Metals (Corrosion of Metals in Tropical Waters), Mater. Prot., 9, No. 1, 14~22 (1970)
- 29) International Nickel Co.: Marine Fouling & Corrosion, Corrosion Reporter, 7, No. 3 (1961) (小林賢三訳: 防食技術, 10, No. 10, 22~28 (1961))
- 30) Tuthill, A. H. & Schillmoller, C. M.: Guidelines for Selection of Marine Materials (小林豊治訳: 防食技術, 16, No. 6, 34 (1967))
- 31) Sharpley, J. H.: Microbiological Corrosion in Waterfloods, Corrosion, 17, No. 8, 386~390 (1961)
- 32) 文献 1). p. 123
- 33) Markovic, T. U. Sevdic, M.: Beitrag zur Systematik der Korrosion der Metalle im Erdreich, 1. Eisen, Werkstoffe u. Korrosion, 10. Ht. 9, 547~555 (1959)
- 34) Franquin, J.: The Corrosion-Protection of Prestressed Concrete Piles. Corrosion Technology, 12, No. 3, 7~13 (1965)
- 35) 古土井光昭, 片山猛雄: 残留水位測定調査, 港研資料, No. 115, 1~105 (1971)

港湾技術研究所報告および資料では以下のように報告済みである。

- 1) 善 一章: 港湾における鋼材腐食の研究(1) 腐食速度推定法に関する研究, 港研報告, 5, No. 8, 1~184 (1966)
- 2) 善 一章: 港湾における鋼材腐食の研究(1) —セメント硬化体による防食法, 5, No. 9, 1~141 (1966)
- 3) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第1報), 港研資料, No. 49, 1~136 (1968)
- 4) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第2報), 港研資料, No. 84, 1~87 (1969)
- 5) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第3報), 港研資料, No. 99, 1~99 (1970)
- 6) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第4報), 港研資料, No. 111, 1~70 (1971)
- 7) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第5報), 港研資料, No. 128, 1~86 (1971)
- 8) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第6報), 港研資料, No. 131, 1~104 (1972)
- 9) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第7報), 港研資料, No. 138, 1~101 (1972)
- 10) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第8報), 港研資料, No. 139, 1~58 (1972)
- 11) 善, 阿部: 港湾鋼構造物の腐食調査(第9報), 港研資料, No. 147, 1~81 (1972)
- 12) 善, 阿部: 東京港および小名浜港における鋼管杭の腐食調査, 港研資料, No. 190, 1~22 (1974)
- 13) 善, 阿部: 秋田港, 釧路港および網走港における腐食調査, 港研資料, No. 198, 1~88 (1974)
- 14) 善, 阿部: 東京港月島岸壁, 尼崎港第一閘門および浜坂漁港内東防波堤における腐食調査, 港研資料, No. 229, 1~37 (1975)

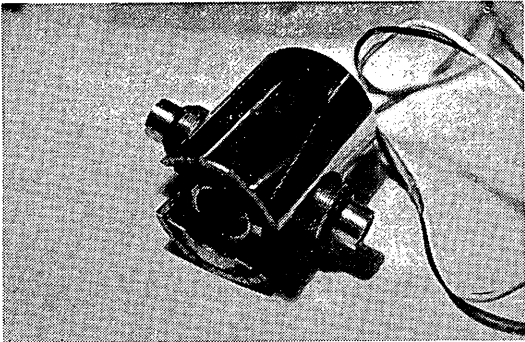


超音波式探傷厚み計（水中用）
左：本体，右：探触子

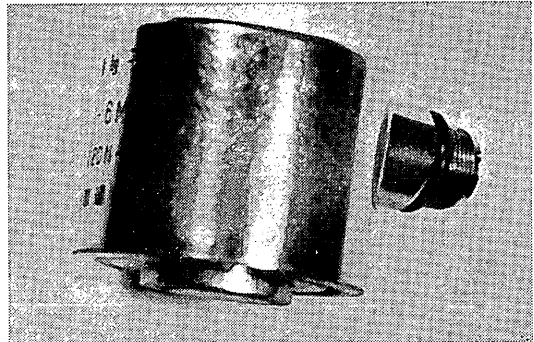


超音波式共振厚み計（水中用）
右：本体，中：モニター，左：探触子

写真-4.1 超 音 波 式 厚 み 計



超音波式探傷厚み計用探触子



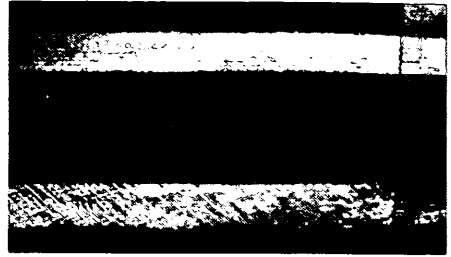
超音波式共振厚み計用探触子

写真-4.2 超 音 波 式 厚 み 計 用 探 触 子

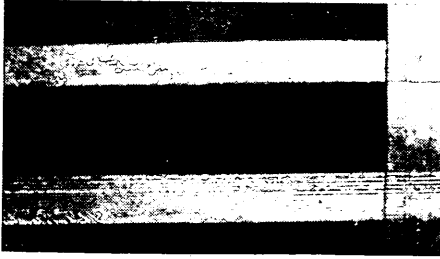
海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策



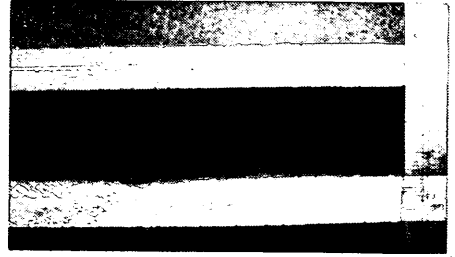
+2.28 m (コンクリート中)



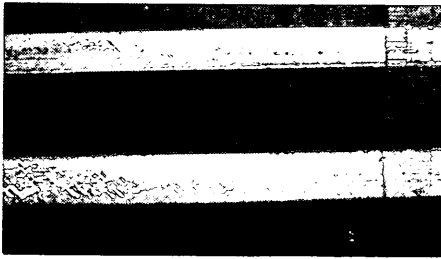
-4.0 m (海水中)



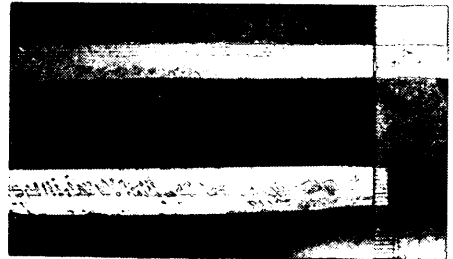
+1.80 m (H. W. L.)



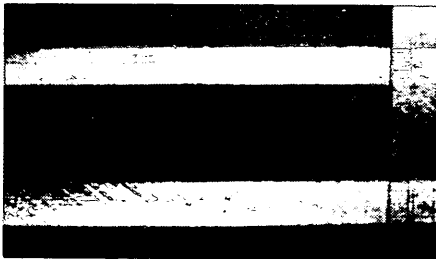
-4.5 m (海泥面付近)



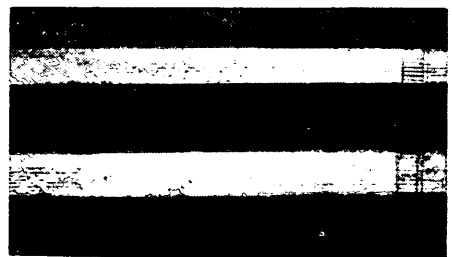
-1.0 m (海水中)



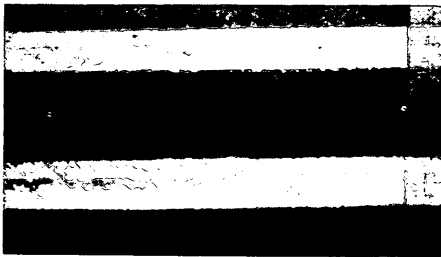
-5.0 m (海泥中)



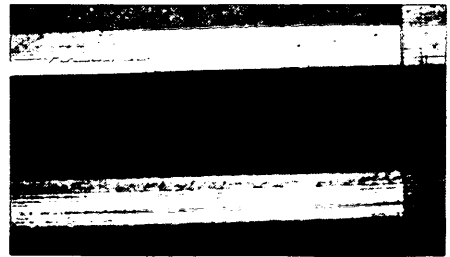
-2.0 m (海水中)



-6.0 m (海泥中)



-3.0 m (海水中)

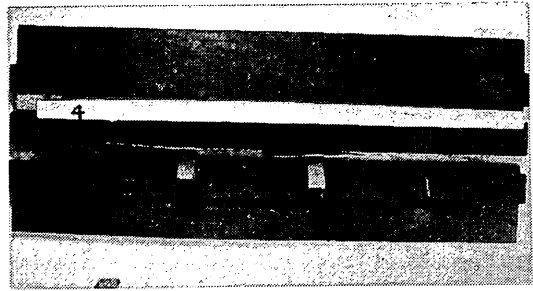


-7.0 m (海泥中)

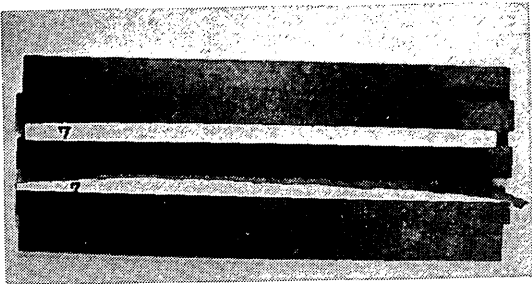
写真-5.1 北浜港-4.5 m 岸壁における鋼矢板の断面(1) (上: 凸面, 下: 凹面) (34年経過)



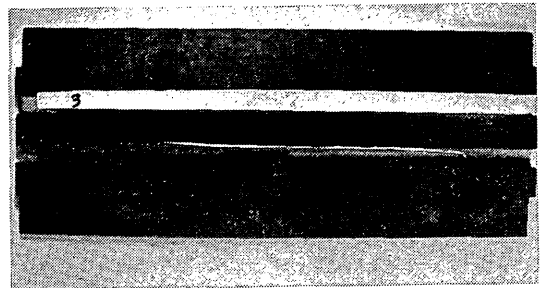
凹矢板
 7 : +0.5 m 3 : +0.1 m
 6 : +0.4 m 2 : ±0.0 m
 5 : +0.3 m 1 : -0.1 m
 4 : +0.2 m



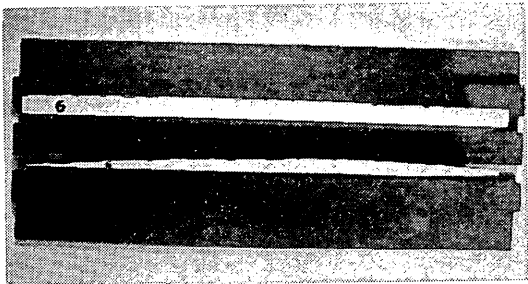
+0.2 m 上：凹矢板，下：凸矢板



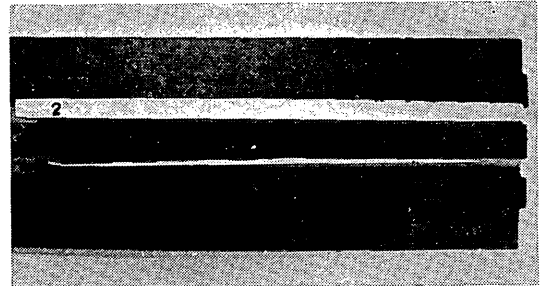
+0.5 m 上：凹矢板，下：凸矢板



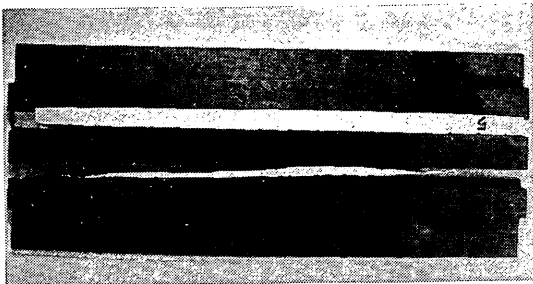
+0.1 m 上：凹矢板，下：凸矢板



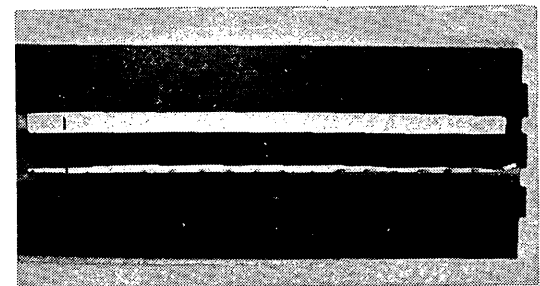
+0.4 m 上：凹矢板，下：凸矢板



±0.0 m 上：凹矢板，下：凸矢板

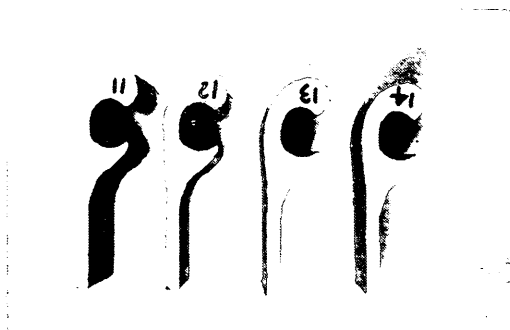
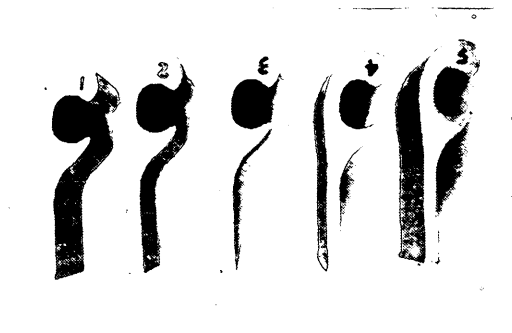


+0.3 m 上：凹矢板，下：凸矢板



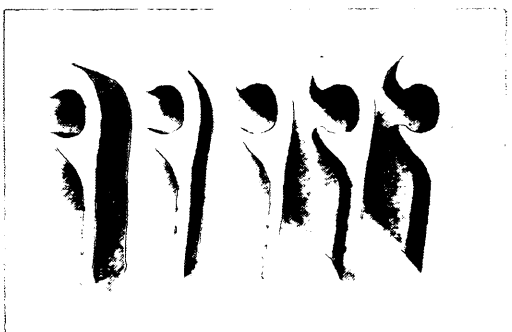
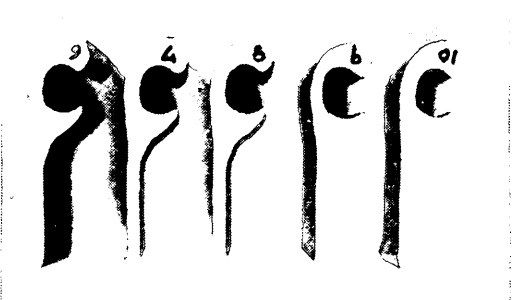
-0.1 m 上：凹矢板，下：凸矢板

写真-5.2 北湊港 -4.5 m 岸壁における鋼矢板の断面(2) (34年経過)



1, 2, 3, 4, 5の裏

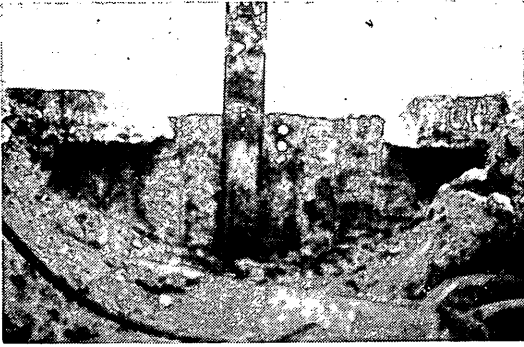
11, 12, 13, 14の裏



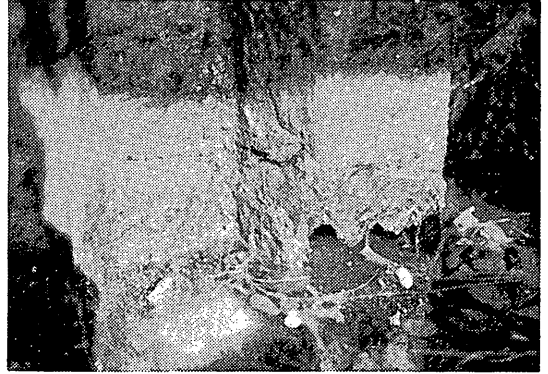
6, 7, 8, 9, 10の裏

No.	深 度(m)	左 右
1	-0.1	左
2	±0.0	左
3	+0.1	左
4	+0.2	左
5	+0.3	左
6	+0.4	左
7	+0.5	左
8	-0.1	右
9	±0.0	右
10	+0.1	右
11	+0.2	右
12	+0.3	右
13	+0.4	右
14	+0.5	右

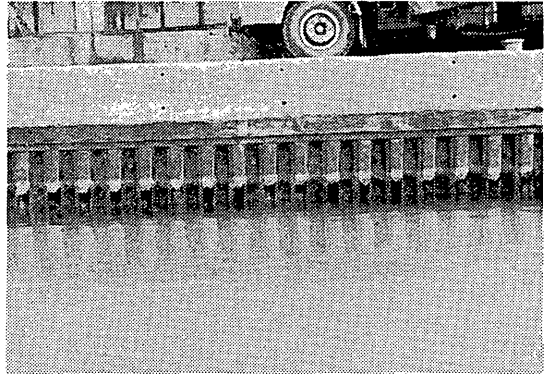
写真-5.3 北浜港 -4.5 m 岸壁における鋼矢板の断面(3) (爪部) (34年経過)



凹鋼矢板の引き抜き



凸鋼矢板の引き抜き



35 年 経 過

写真-5.4 北淡港 -4.5 m 岸壁における鋼矢板の引き抜き状況 (34 年経過)

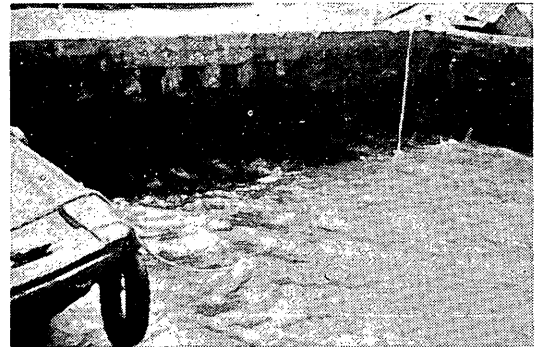
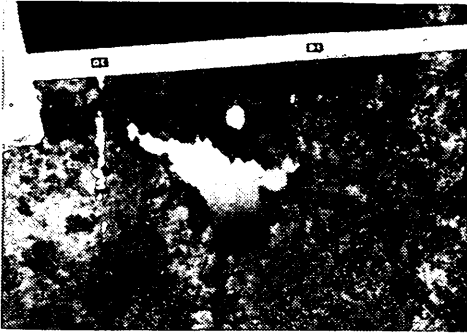


写真-5.5 腐食傾向(a)の発生状況



写真-5.6 今治港浅川荷揚場における干潮時の鋼矢板面 (40 年経過)



西浜埠頭G岸壁



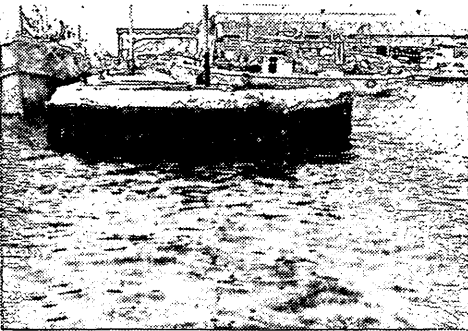
西浜埠頭G岸壁



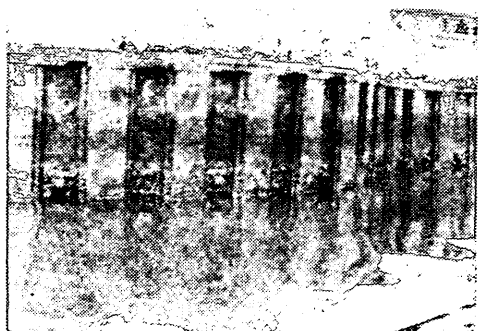
万代町船溜前面



万代町船溜前面



万代町船溜



万代町船溜



浅野町岸壁

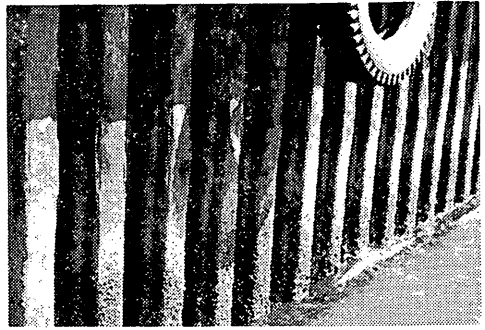


万代町岸壁

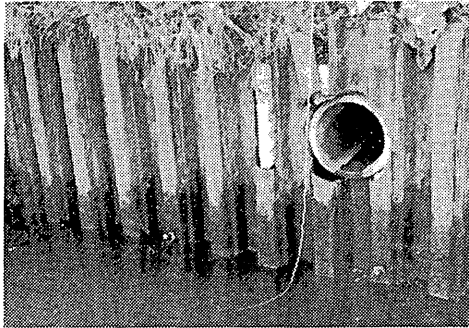
写真-5.7 H. W. L. 上の腐食



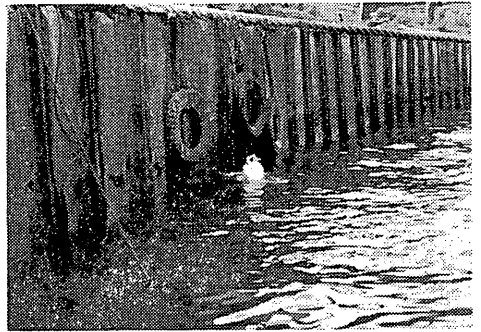
室蘭港中卯埠頭



室蘭港中卯埠頭



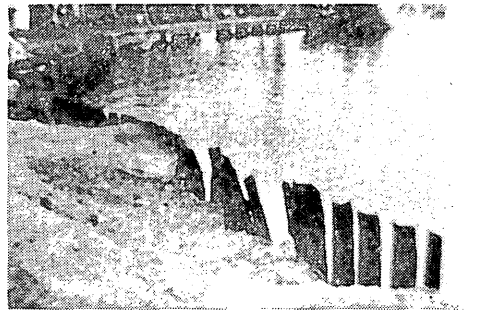
留萌港南岸土留護岸



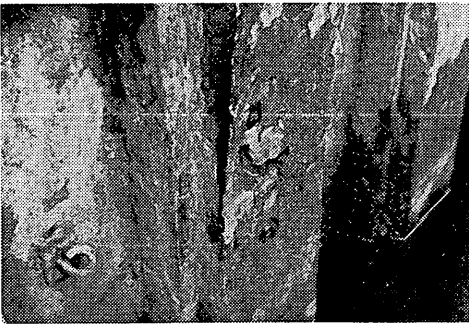
留萌港南岸地区護岸



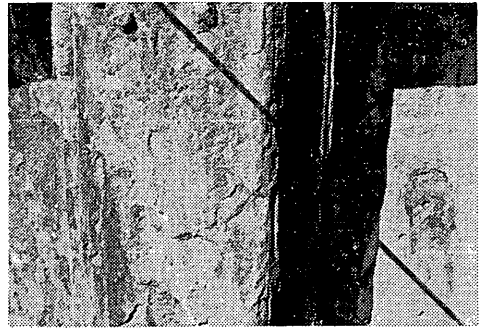
小樽港信香町物揚場



留萌港南岸地区護岸

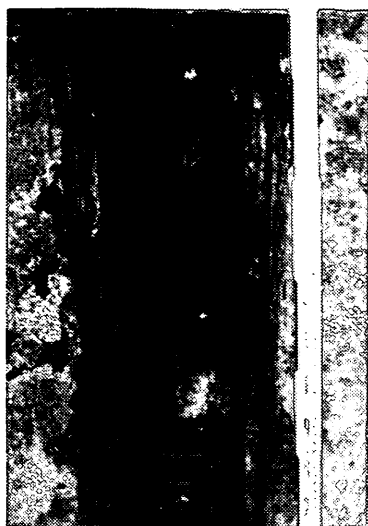


下北埠頭 -5.5 m 岸壁

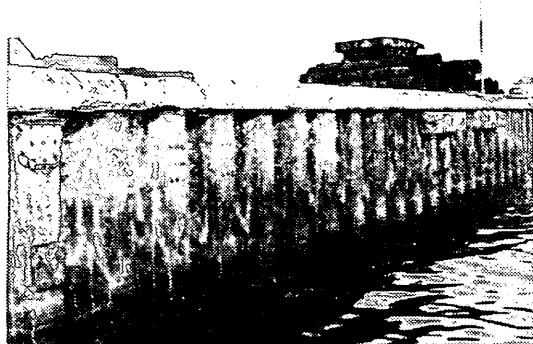


下北埠頭 -5.5 m 岸壁

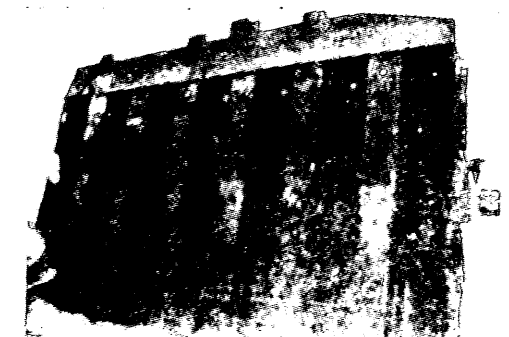
写真-5.8 H. W. L. 上 の 腐 食



秋田港南埠頭 -4.6 m 岸壁



秋田港南埠頭 -4.6 m 岸壁

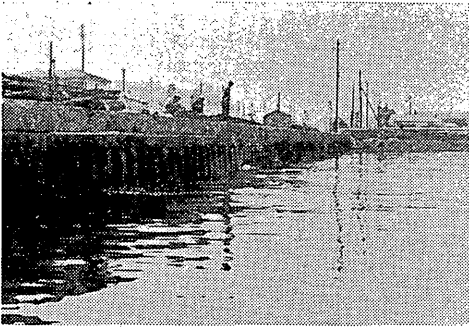


塩釜港中埠頭

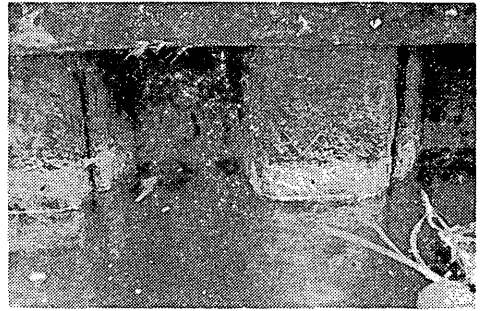


片上港同和鉱業第2けい船岸

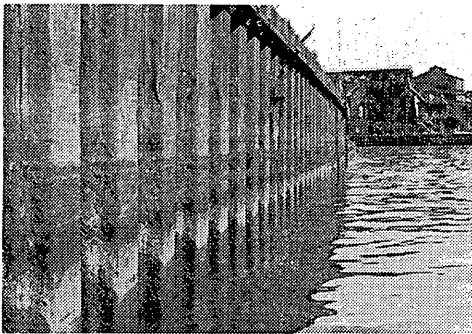
写真-5.9 H.W.L. 上の腐食



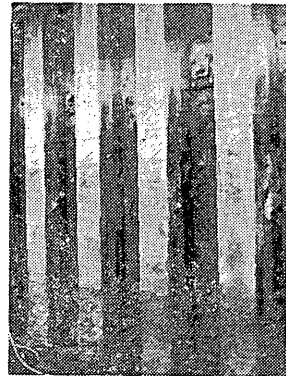
函館港海岸町A岸壁



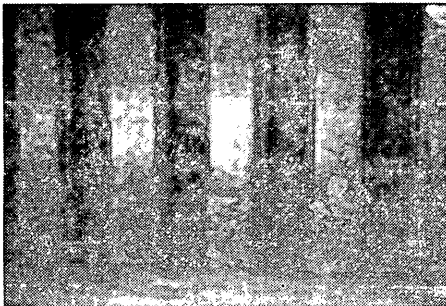
恵曇港2号岸壁



広畑港西浜護岸



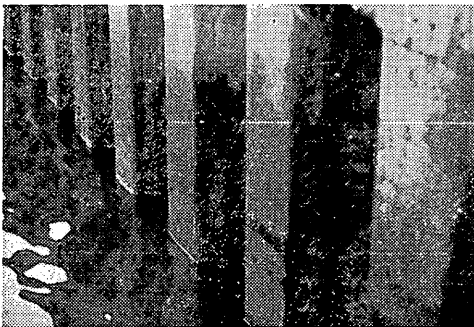
今治港浅川荷揚場



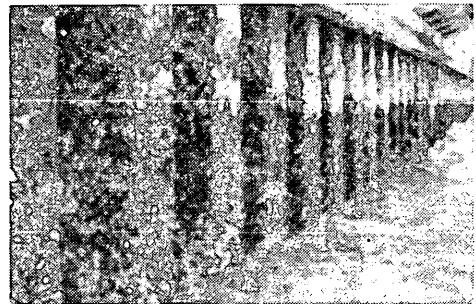
水島港Aけい船岸



橘港Aけい船岸



北湊港 -4.5 m 岸壁



津久見港小野田第2工場大平岸壁

写真-5.10 H. W. L. 上の腐食

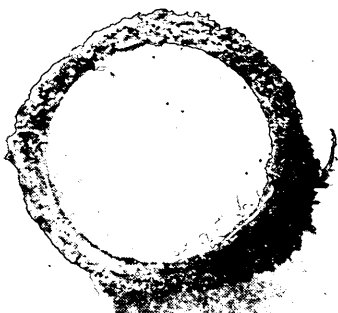


写真-5.11 切り取りタイ・ロッドの断面



写真-5.13 H. W. L. 上の腐食

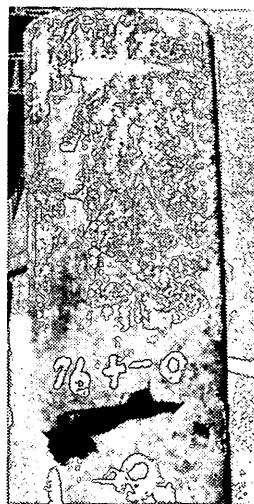


写真-5.12 平均干潮面直下付近の腐食穴の状況
(東京港豊海水産埠頭)



写真-5.14 門扉スキンプレート（平均干潮面直下付近エッジ部の腐食）



写真-5.15 門扉スキンプレート（下端の腐食）

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

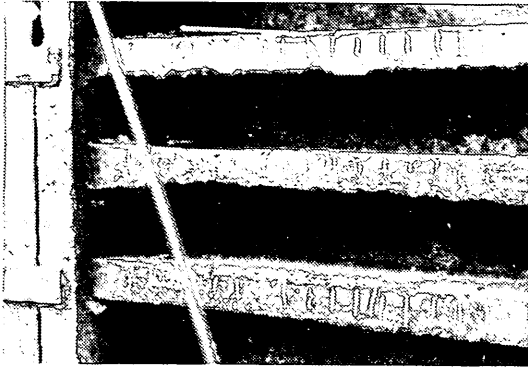


写真-5.16 水平材エッジの腐食



写真-5.17 ジェット・パイプの腐食

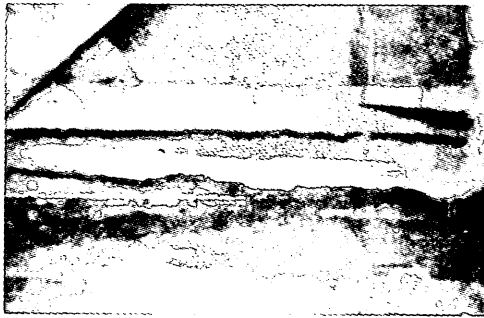


写真-5.18 ジェット・パイプの腐食

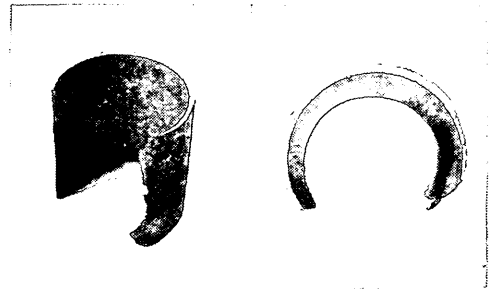


写真-5.19 ジェット・パイプの腐食

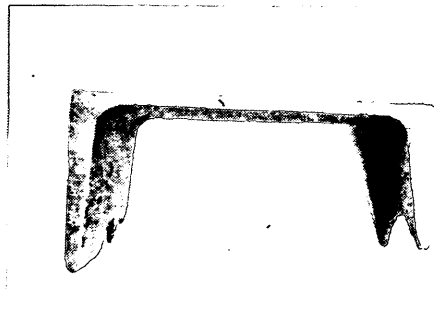


写真-5.20 溝形鋼エッジ部の腐食

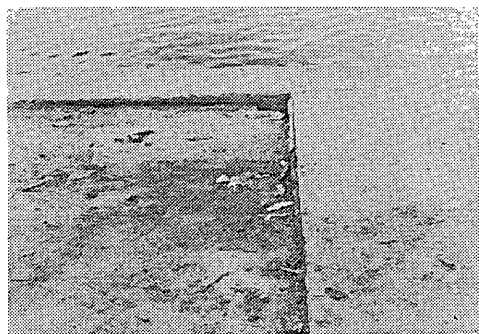
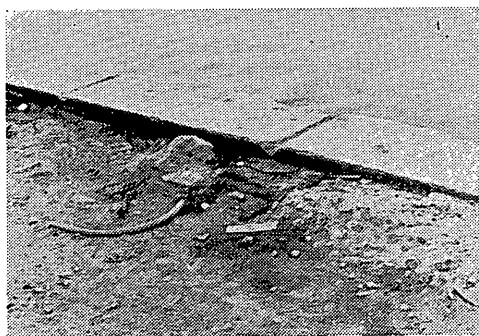


写真-5.21 腐食傾向(a)の発生による上部工の沈下状況



写真-5.22 腐食傾向(a)の発生と超波による上部工の陥没状況

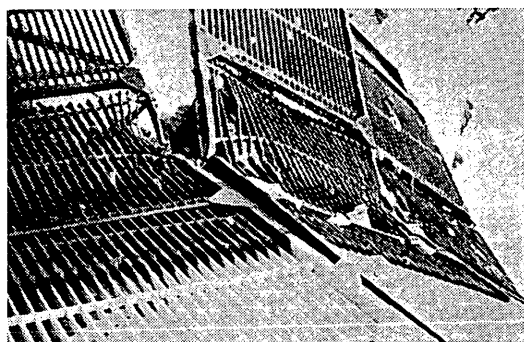


写真-5.23 腐食によるスクリーンの破断状況



写真-6.1 付 着 物

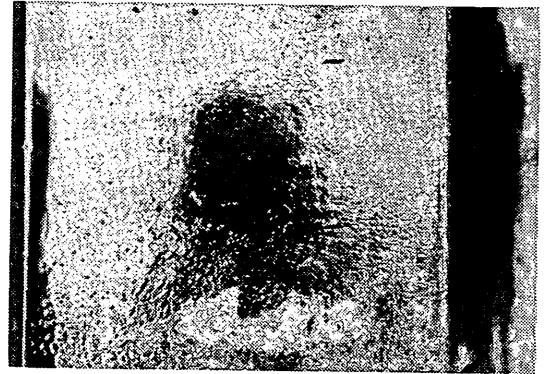
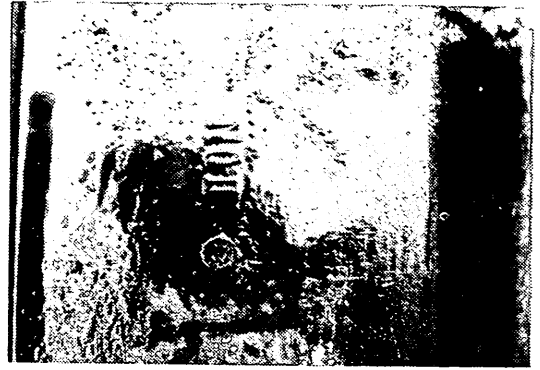


写真-6.3 コンクリート被覆直下の鋼矢板面
(上:コンクリート中, 下:コンクリート直下 0.4m)

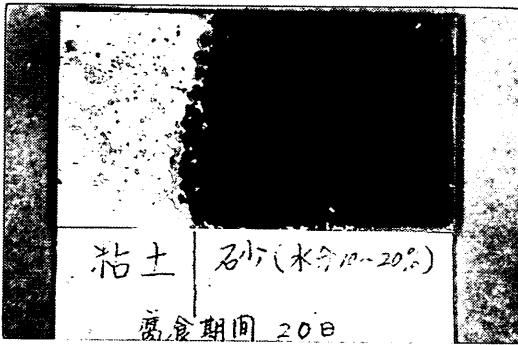


写真-6.2 マクロ腐食現象 (20日間)



写真-6.4 コンクリート被覆直下の鋼管杭面

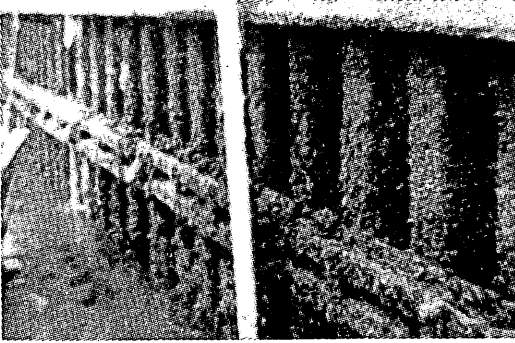


写真-7.1 犠牲鋼材の取付状況

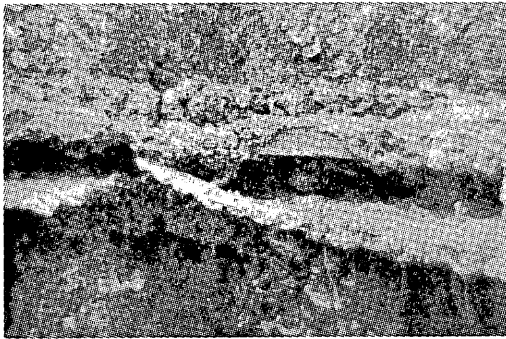


写真-7.2 犠牲鋼材の腐食状況

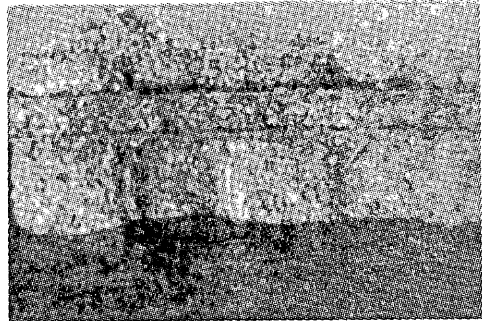


写真-7.3 コンクリート被覆深度を M.S.L. 下まで下げ、L.W.L. に溝形鋼を取付けた例

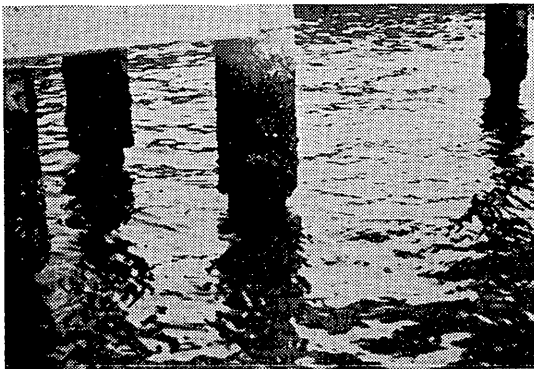


写真-7.4 コンクリート被覆を L.W.L. まで下げた鋼管杭構造物の例（東京港）

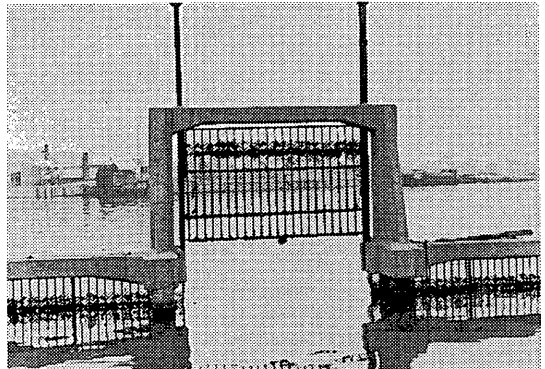
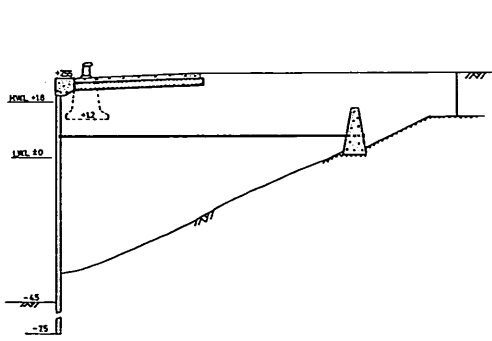
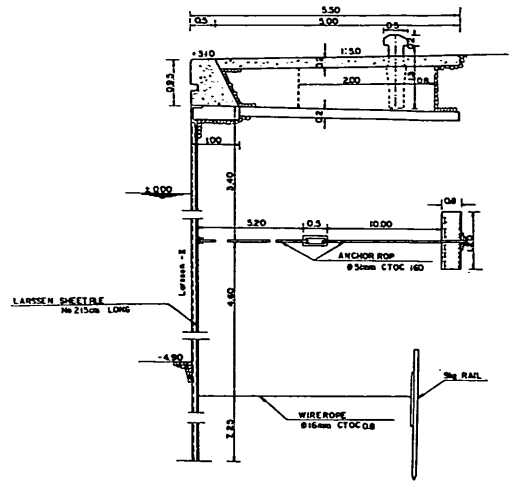


写真-7.5 丸鋼棒を使用したスクリーンの例

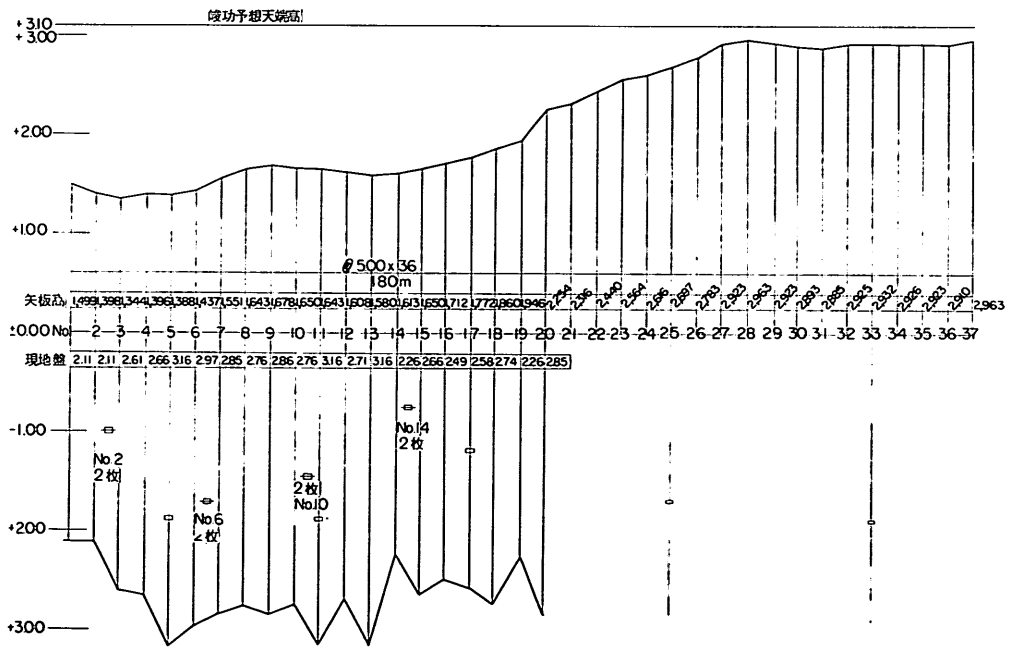
海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策



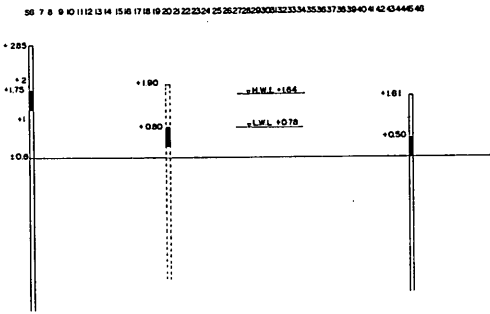
付図-5.1 北湊港 -4.5 m 岸壁断面図



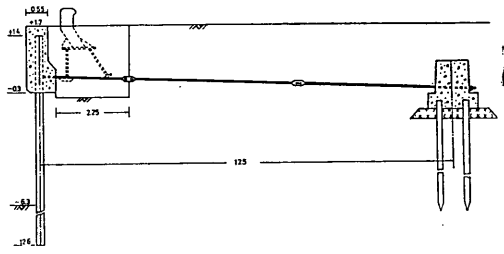
付図-5.2 塩釜港中埠頭断面図



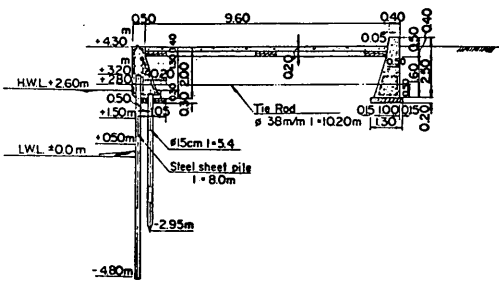
付図-5.3 塩釜港中埠頭における沈下状況



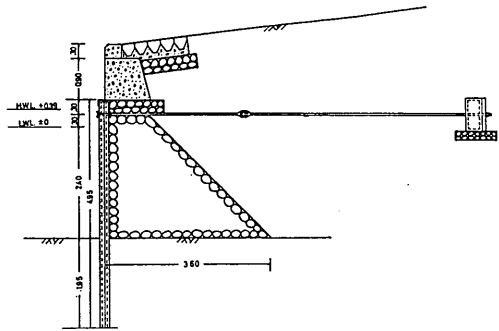
付図-5.4 塩釜港中埠頭の沈下状況



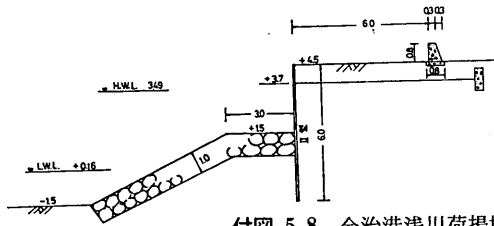
付図-5.5 富山港 -7.5 m 岸壁断面図



付図-5.6 G 港岸壁断面図

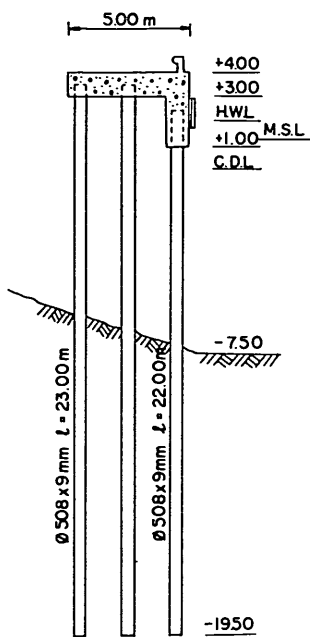


付図-5.7 小樽港信香町物揚場断面図

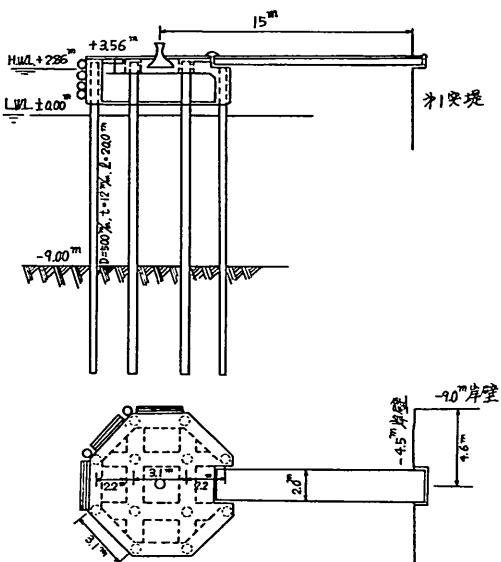


付図-5.8 今治港浅川荷揚場断面図

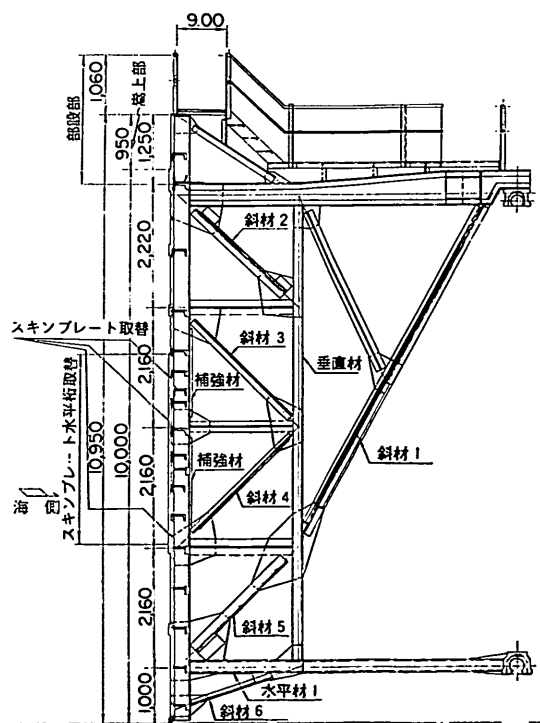
海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策



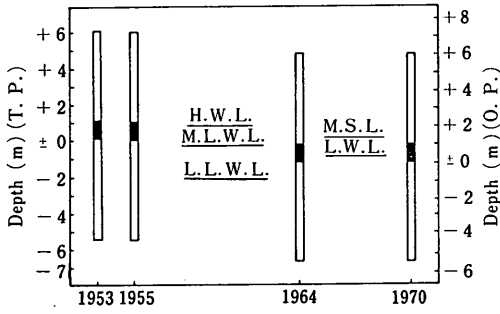
付図-5.9 東京港豊海水産埠頭ドルフィン断面図



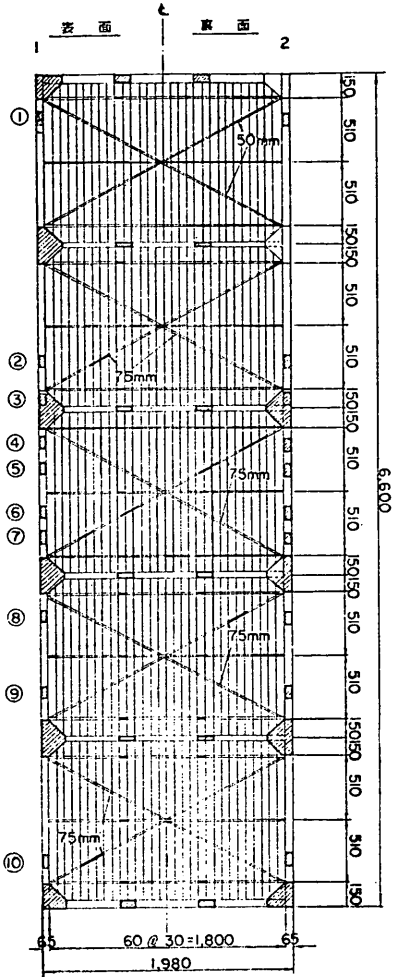
付図-5.10 下関港における調査ドルフィン



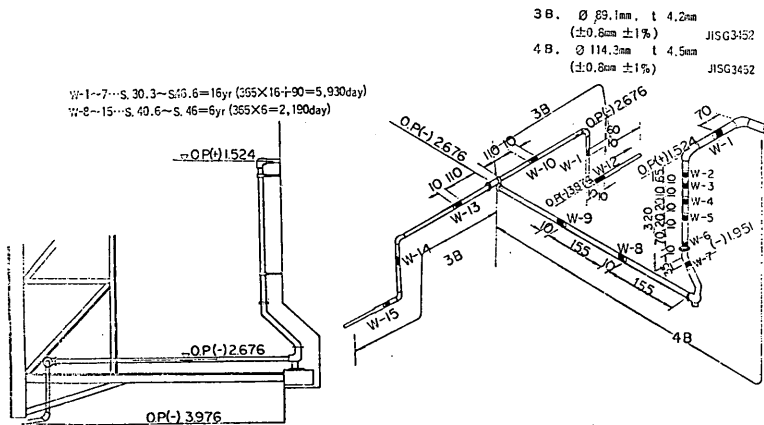
付図-5.11 尼ヶ崎港蓬川水門門扉設計図



付図-5.12 尼ヶ崎港における門扉の沈下状況

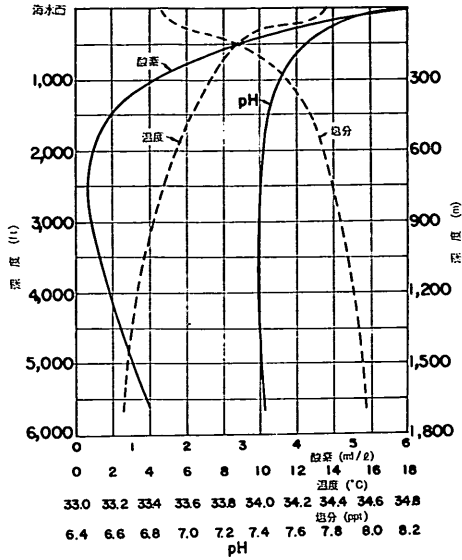


付図-5.14 スクリーン各部材のガス切断箇所

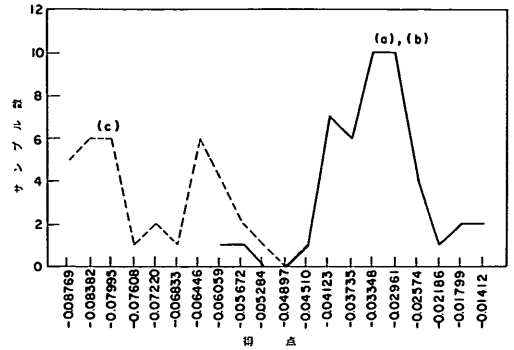


付図-5.13 ジェットパイプのコア採取箇所

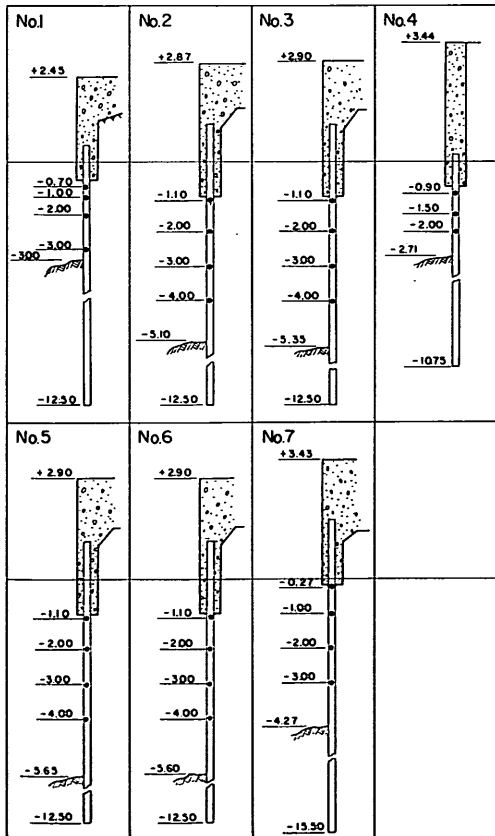
海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策



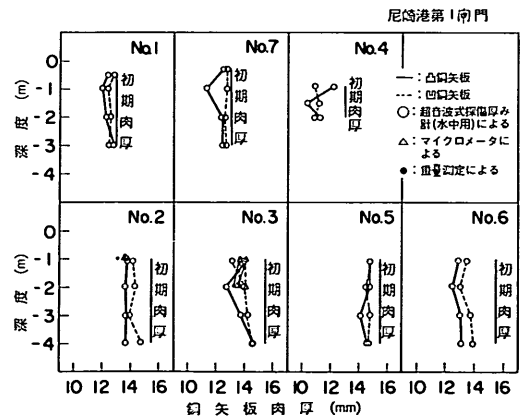
付図-6.1 カリフォルニア南岸沖の海洋データ



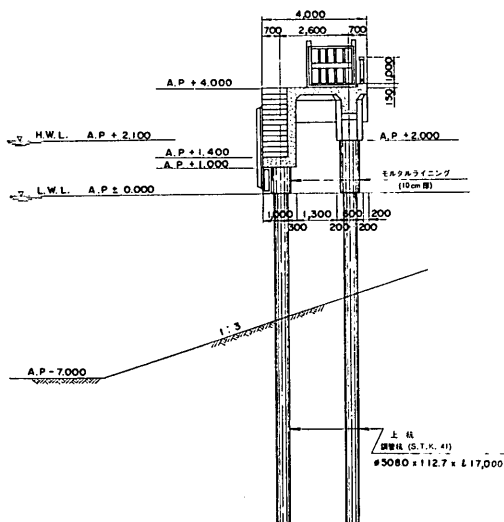
付図-7.1 腐食傾向得点分布 (外的基準が2分類 (a, bとc) のケース)



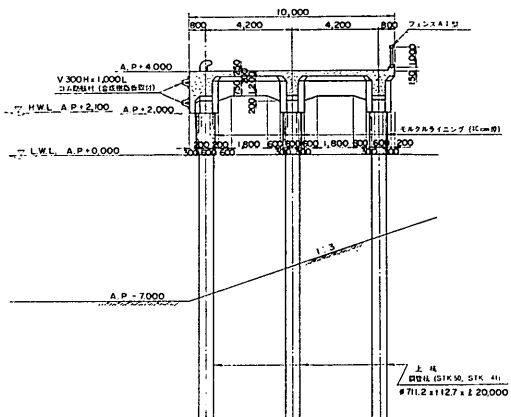
付図-7.2 閉室鋼矢板の測定箇所



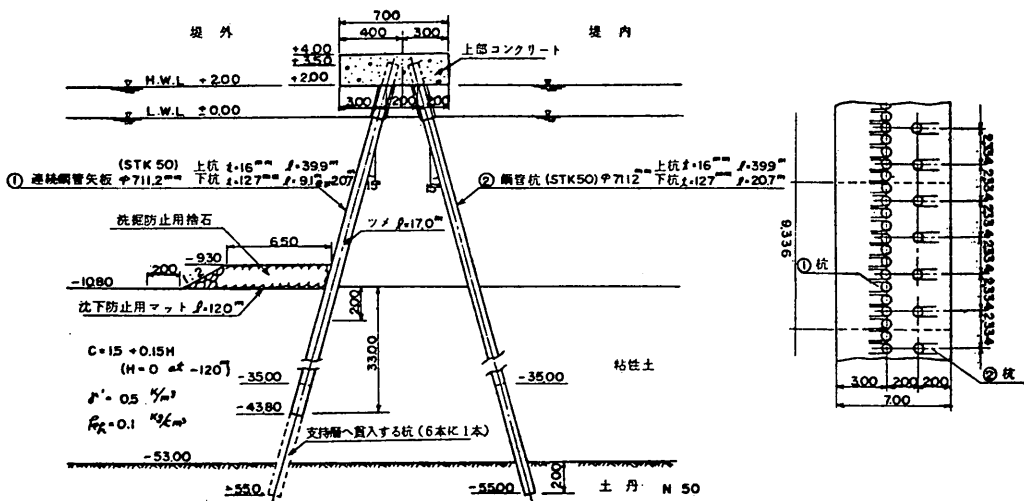
付図-7.3 鋼矢板の現有肉厚



付図-7.4 モルタルライニングを L.W.L. まで下げた鋼管杭施工例 (東京港)



付図-7.5 モルタルライニングを L.W.L. まで下げた鋼管杭施工例 (東京港)



付図-7.6 船溜防波堤(A)標準断面図及び平面図

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-5.1 北湊港 -4.5 m 岸壁における測定結果 (平坦面)

(34年経過, 重量測定による)

No.	水深 (m)	形状寸法 (mm)				表面積* (cm ²)	重量 (g)	肉厚 (mm)
		a	b	c	d			
B (凹)	+ 2.28	98.0	97.0	272.8	272.8	265.98	2,350.0	11.241
	+ 1.80					169.82	1,347.0	10.092
	+ 0.50	73.6	73.2	274.7	274.1	201.41	1,625.5	10.268
	+ 0.40	70.3	70.5	274.2	273.6	192.83	1,576.5	10.402
	+ 0.30	68.7	68.2	271.2	271.3	185.67	1,514.6	10.378
	+ 0.20	69.7	69.1	270.0	270.5	187.55	1,541.3	10.455
	+ 0.10	71.0	71.4	272.3	274.3	194.59	1,592.5	10.412
	± 0.00			271.3	273.8		1,552.0	
	- 0.10	72.3	72.3	256.9	250.2	183.35	1,514.5	9.516
	- 1.00	96.4	98.4	281.0	281.0	273.69	2,230.0	10.366
	- 2.00	98.0	96.8	279.4	278.0	271.45	2,167.0	10.156
	- 3.00	99.0	98.8	276.6	281.8	276.13	2,366.0	10.901
	- 4.00	96.6	95.8	276.8	276.2	265.99	2,299.5	10.998
	- 4.50	96.4	96.4	280.2	280.6	270.31	2,389.0	11.244
	- 5.00	97.4	97.2	277.0	276.4	269.23	2,395.0	11.317
	- 6.00	96.4	96.8	283.6	281.8	273.09	2,469.0	11.502
- 7.00	97.0	98.8	280.6	281.4	275.10	2,478.0	11.460	
C (凸)	+ 2.28	96.0	97.4	276.6	276.8	267.57	2,007.0	9.543
	+ 1.80	96.8	96.4	276.2	280.2	268.74	1,803.5	9.538
	+ 0.50	74.0	72.6	306.0	304.8	223.7	1,414.8	8.046
	+ 0.40	70.2	69.6	穴	穴		661.0	
	+ 0.30	67.9	69.6	"	"		195.6	
	+ 0.20	穴	穴	"	"		14.4	
	+ 0.10	72.8	71.8	"	"		88.1	
	± 0.00	70.9	68.9	"	"		208.3	
	- 0.10	67.0	69.4	270.6	269.3	184.1	430.7	2.976
	- 1.00	100.0	99.0	277.2	282.3	278.40	1,807.0	8.241
	- 2.00	97.0	96.6	271.8	270.2	262.33	1,809.0	8.763
	- 3.00	98.2	96.4	274.2	277.0	268.16	2,027.0	8.582
	- 4.00	97.4	98.4	274.4	273.8	268.34	2,014.0	9.548
	- 4.50	97.4	96.8	279.0	279.2	271.01	2,089.5	9.809
	- 5.00	98.4	97.0	278.4	277.0	271.31	2,089.5	9.798
	- 6.00	98.6	97.8	277.2	274.0	270.64	2,123.0	9.980
- 7.00	96.6	95.8	278.8	278.8	268.21	2,096.0	9.042	

* $\left(\frac{a+b}{2}\right)\left(\frac{c+d}{2}\right)$

付表-5.2 北浜港 -4.5 m 岸壁における測定結果 (平坦面)

(34年経過)

No.	水 深 (m)	マイクロ・メータによる				重量測定による			
		肉厚減量(mm)		腐食速度(mm/yr)*		肉厚減量(mm)		腐食速度(mm/yr)*	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
B (凹)	+ 2.28	-0.981	—	0	—	-0.741	—	0	—
	+ 1.80	-0.050	0.931	0	0.027	0.408	1.149	0.012	0.034
	+ 0.50	-0.570	0.911	0	0.027	0.232	0.973	0.007	0.029
	+ 0.40	-0.141	0.840	0	0.025	0.098	0.839	0.003	0.025
	+ 0.30	-0.060	0.921	0	0.027	0.122	0.863	0.004	0.025
	+ 0.20	-0.237	0.744	0	0.022	0.045	0.786	0.001	0.023
	+ 0.10	-0.192	0.789	0	0.023	0.088	0.829	0.003	0.024
	± 0.00	-0.178	0.803	0	0.024				
	- 0.10	-0.167	0.814	0	0.024	0.984	1.725	0.029	0.051
	- 1.00	-0.128	0.853	0	0.025	0.134	0.875	0.004	0.026
	- 2.00	-0.048	0.933	0	0.027	0.344	1.085	0.010	0.032
	- 3.00	-0.683	0.298	0	0.009	-0.401	0.340	0	0.010
	- 4.00	-0.709	0.272	0	0.008	-0.498	0.243	0	0.007
	- 4.50	-0.958	0.023	0	0.001	-0.744	-0.003	0	0
	- 5.00	-1.047	-0.066	0	0	-0.817	-0.076	0	0
	- 6.00	-1.252	-0.271	0	0	-1.002	-0.261	0	0
- 7.00	-1.177	-0.196	0	0	-0.960	-0.219	0	0	
C (凸)	+ 2.28	0.724	—	0.021	—	0.957	—	0.028	—
	+ 1.80	1.755	1.031	0.052	0.030	1.962	1.005	0.058	0.030
	+ 0.50	1.873	1.149	0.055	0.034	2.454	1.497	0.072	0.044
	+ 0.40	5.036	4.312	0.148	0.127				
	+ 0.30	8.483	7.759	0.250	0.228				
	+ 0.20	9.665	8.941	0.284	0.263				
	+ 0.10	9.260	8.020	0.272	0.236				
	± 0.00	8.605	7.881	0.253	0.232				
	- 0.10	7.244	6.520	0.213	0.192	7.524	6.567	0.221	0.193
	- 1.00	1.920	1.196	0.057	0.035	2.259	1.302	0.066	0.038
	- 2.00	1.473	0.749	0.043	0.022	1.737	0.780	0.051	0.023
	- 3.00	0.611	-0.113	0.018	0	1.918	0.961	0.056	0.028
	- 4.00	0.753	0.029	0.022	0.001	0.952	-0.005	0.028	0
	- 4.50	0.481	-0.243	0.014	0	0.691	-0.266	0.020	0
- 5.00	0.469	-0.255	0.014	0	0.702	-0.255	0.021	0	
- 6.00	0.195	-0.529	0.006	0	0.520	-0.437	0.015	0	
- 7.00	0.329	-0.395	0.010	0	0.558	-0.399	0.016	0	

(1) 初期肉厚をカタログ厚 10.5 mm としたとき

(2) 初期肉厚をコンクリート中の肉厚としたとき

* 両面 (海側+陸側)

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-5.3 北湊港 -4.5 m 岸壁における測定結果 (側面)

(34年経過, マイクロ・メータによる)

No.	深 度 (m)	肉 厚 減 量 (mm)			腐 食 速 度 (mm/yr)**		
		左	右	左 右	左	右	左 右
B (凹)	+ 2.28	— *	— *	—	—	—	—
	+ 1.80	1.500	1.535	1.518	0.044	0.045	0.045
	+ 0.50	1.359	1.198	1.278	0.040	0.053	0.038
	+ 0.40	1.653	1.370	1.512	0.049	0.040	0.045
	+ 0.30	1.362	1.644	1.503	0.040	0.048	0.044
	+ 0.20	1.342	1.887	1.615	0.040	0.056	0.048
	+ 0.10	1.563	1.535	1.549	0.046	0.045	0.046
	± 0.00	1.177	1.432	1.305	0.035	0.042	0.038
	- 0.10	1.101	1.255	1.178	0.032	0.037	0.035
	- 1.00	1.365	1.272	1.319	0.040	0.037	0.039
	- 2.00	1.096	1.199	2.148	0.032	0.035	0.063
	- 3.00	0.645	0.170	0.408	0.019	0.005	0.012
	- 4.00	0.505	0.698	0.602	0.015	0.021	0.018
	- 4.50	0.454	0.283	0.369	0.013	0.008	0.011
	- 5.00	2.557	0.274	1.416	0.075	0.008	0.042
- 6.00	2.114	0.320	1.217	0.062	0.009	0.036	
- 7.00	0.165	0.191	0.178	0.005	0.006	0.005	
C (凸)	+ 2.28	— *	— *	—	—	—	—
	+ 1.80	0.900	1.047	0.973	0.026	0.031	0.029
	+ 0.50	1.896	2.615	2.255	0.056	0.077	0.066
	+ 0.40	3.240	3.069	3.154	0.095	0.090	0.093
	+ 0.30	3.266	3.973	3.619	0.096	0.117	0.106
	+ 0.20	3.199	3.281	3.240	0.094	0.097	0.095
	+ 0.10	2.909	3.294	3.107	0.086	0.097	0.091
	± 0.00	2.500	3.427	2.963	0.074	0.101	0.087
	- 0.10	3.228	3.229	3.228	0.095	0.095	0.095
	- 1.00	1.285	-0.292	0.496	0.038	0	0.015
	- 2.00	2.574	-0.426	1.074	0.076	0	0.032
	- 3.00	0.444	0.655	0.549	0.013	0.019	0.016
	- 4.00	0.400	0.683	0.541	0.012	0.020	0.016
	- 4.50	0.337	0.646	0.491	0.010	0.019	0.014
	- 5.00	0.264	0.264	0.264	0.008	0.008	0.008
- 6.00	0.207	0.203	0.205	0.006	0.006	0.006	
- 7.00	0.105	0.249	0.177	0.003	0.007	0.005	

* コンクリート中肉厚を初期肉厚とした

** 両面 (海側+陸側)

付表-5.4 塩釜港中埠頭における測定結果（平坦面）

深 度*	初期肉厚 (mm)	凸 矢 板				凹 矢 板			
		肉厚減量 (mm)		腐食速度 (mm/yr)**		肉厚減量 (mm)		腐食速度 (mm/yr)**	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
+ 1.54	10.2	0.378	0.119	0.010	0.003	3.328	3.276	0.085	0.084
+ 1.41	10.2	1.159	1.007	0.030	0.030	2.213	2.047	0.057	0.052
+ 1.28	10.2	1.570	1.364	0.040	0.035	2.388	2.173	0.061	0.056
+ 1.16	10.2		0.824		0.021	2.249	2.129	0.058	0.055
+ 1.04	10.2	0.623	0.445	0.016	0.011	1.970	1.853	0.051	0.048
+ 0.91	10.2	0.973	0.830	0.025	0.021	1.703	1.569	0.044	0.040
+ 0.78	10.2	1.568	1.425	0.040	0.037	2.186	2.112	0.056	0.054
+ 0.66	10.2	1.397	1.112	0.036	0.029	2.308	2.173	0.059	0.056
+ 0.51	10.2	1.360	0.950	0.035	0.024	2.603	2.500	0.067	0.064
+ 0.38	10.2	4.068	3.537	0.104	0.091	2.431	2.307	0.062	0.059
+ 0.25	10.2	6.588	6.493	0.169	0.166	2.379	2.300	0.061	0.059
+ 0.13	10.2	7.567	7.386	0.194	0.189	2.462	2.405	0.063	0.062
+ 0.01	10.2	7.480	7.379	0.192	0.189	2.235	2.235	0.060	0.057
- 0.12	10.2	5.407	5.313	0.139	0.136	2.377	2.276	0.061	0.058
- 0.25	10.2	5.189	5.117	0.133	0.131	2.108	1.993	0.054	0.051
- 0.38	10.2	5.801	5.650	0.149	0.145	2.087	1.994	0.054	0.051
- 0.51	10.2	4.943	4.754	0.127	0.122	2.051	1.866	0.053	0.048
- 0.64	10.2	4.890	4.703	0.125	0.121	2.167	2.001	0.056	0.051
- 0.77	10.2	5.347	5.179	0.137	0.133	2.216	2.030	0.056	0.052
- 0.88	10.2	4.897	4.545	0.126	0.117	2.411	2.300	0.062	0.059
- 1.01	10.2	4.084	3.958	0.105	0.101	2.515	2.380	0.064	0.061
- 1.14	10.2	4.946	4.804	0.127	0.123	2.615	2.450	0.067	0.063
- 1.27	10.2	4.876	4.729	0.125	0.121				
- 1.38	10.2	2.339	2.210	0.060	0.057				

* 調査時（S.45年6月）の深度 ** 両面（海側+陸側）

(1) 重量測定による。

(2) マイクロ・メータによる。

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-5.5 塩釜港中埠頭における測定結果（側面）

（マイクロ・メータによる）

深 度 (m)	初期肉厚 (mm)	凸 矢 板						凹 矢 板					
		肉厚減量 (mm)			腐食速度 (mm/yr)*			肉厚減量 (mm)			腐食速度 (mm/yr)*		
		側面 (1)	側面 (2)	側面 (1),(2)	側面 (1)	側面 (2)	側面 (1),(2)	側面 (1)	側面 (2)	側面 (1),(2)	側面 (1)	側面 (2)	側面 (1),(2)
+ 1.54	8.7	3.484	3.772	3.628	0.089	0.097	0.093	3.648	3.886	3.767	0.094	0.100	0.097
+ 1.41	8.7	3.833	4.273	4.053	0.098	0.110	0.104	3.573	3.927	3.750	0.092	0.101	0.096
+ 1.28	8.7	3.025	3.182	3.104	0.078	0.082	0.080	3.399	3.642	3.521	0.087	0.093	0.090
+ 1.16	8.7	2.026	2.901	2.464	0.052	0.074	0.063	2.208	3.645	2.927	0.057	0.093	0.075
+ 1.04	8.7	2.097	2.059	2.078	0.054	0.053	0.053	2.160	3.130	2.645	0.055	0.080	0.068
+ 0.91	8.7	2.017	2.176	2.097	0.052	0.056	0.054		2.859			0.073	
+ 0.78	8.7	1.897	2.707	2.302	0.049	0.069	0.059	2.137	3.246	2.692	0.055	0.083	0.069
+ 0.66	8.7	2.567	2.436	2.502	0.066	0.062	0.064	2.713	2.892	2.803	0.070	0.074	0.072
+ 0.51	8.7	2.899	3.096	2.998	0.074	0.079	0.077	2.825	3.413	3.119	0.072	0.088	0.080
+ 0.38	8.7	2.720	3.087	2.904	0.070	0.079	0.074	2.877	3.001	2.939	0.074	0.077	0.075
+ 0.25	8.7	3.414	3.025	3.220	0.088	0.078	0.083	3.419	2.756	3.088	0.088	0.071	0.079
+ 0.13	8.7	2.828	3.053	2.941	0.073	0.078	0.075	3.675	2.666	3.171	0.094	0.068	0.081
+ 0.01	8.7	2.937	3.474	3.206	0.075	0.089	0.082	2.878	2.754	2.816	0.074	0.071	0.072
- 0.12	8.7	3.193	3.062	3.128	0.082	0.079	0.080	3.108	2.733	2.921	0.080	0.070	0.075
- 0.25	8.7	3.244	3.059	3.152	0.083	0.078	0.081	2.528	3.335	2.932	0.065	0.086	0.075
- 0.38	8.7	3.232	2.819	3.026	0.083	0.072	0.078	4.066	2.429	3.248	0.104	0.062	0.083
- 0.51	8.7	3.205	3.747	3.476	0.082	0.096	0.089	2.843	2.605	2.724	0.073	0.067	0.070
- 0.64	8.7	2.654	3.123	2.889	0.068	0.080	0.074	3.600	2.783	3.192	0.092	0.071	0.082
- 0.77	8.7	2.905	3.013	2.959	0.074	0.077	0.076	3.374	2.714	3.044	0.087	0.070	0.078
- 0.88	8.7	3.247	3.412	3.330	0.083	0.087	0.085	3.891	2.508	3.200	0.100	0.064	0.082
- 1.01	8.7	2.594	3.052	2.823	0.067	0.078	0.072	2.883	2.637	2.760	0.074	0.068	0.071
- 1.14	8.7	2.533	2.866	2.700	0.065	0.073	0.069	4.123	2.617	3.370	0.106	0.067	0.086
- 1.27	8.7	2.671	3.137	2.904	0.068	0.080	0.074	2.905	2.569	2.737	0.074	0.066	0.070
- 1.38	8.7	2.777	2.957	2.867	0.071	0.076	0.074		3.087			0.079	

* 両面（海側+陸側） 側面（1）、（2）は左右を示す。

付表-5.6 富山港 -7.5 m 岸壁における測定結果(平坦面)
(34年経過, 重量減量より算出)

測 定 点	深 度 (m)	肉厚減量(mm)		腐食速度(mm/yr)	
		(1)	(2)	(1)	(2)
⑤ (凸)	- 0.3	2.340	2.178	0.069	0.064
	- 1.3	2.553	2.391	0.075	0.070
	- 2.3	2.267	2.105	0.067	0.062
	- 3.3	2.095	1.933	0.062	0.057
	- 4.3	1.673	1.673	0.054	0.049
	- 5.3	1.954	1.954	0.062	0.057
② (凹)	- 0.3	2.294	1.989	0.067	0.059
	- 1.3	1.645	1.340	0.048	0.039
	- 2.3	1.808	1.503	0.053	0.044
	- 3.3	1.757	1.452	0.052	0.043
	- 4.3	1.918	1.613	0.056	0.047
	- 5.3	2.134	1.829	0.063	0.055

- (1) カタログ厚(凸は17.5 mm, 凹は19.0 mm)を初期肉厚とした場合
 (2) コンクリート中の鋼矢板肉厚(凸は17.338 mm, 凹は18.695 mm)を初期肉厚とした場合

付表-5.10 下関港ドルフィン腐食量

深 度 (m)	初期肉厚 (mm)	現有肉厚 平 均 値 (mm)	肉厚減少量 (mm)	腐食速度 (mm/yr)
+ 2	12.0	11.80	0.20	0.024
+ 1	12.0	11.64	0.36	0.042
± 0	12.0	11.73	0.27	0.032
- 1	12.0	11.74	0.26	0.031
- 2	12.0	11.82	0.18	0.021
- 3	12.0	11.81	0.19	0.022
- 4	12.0	11.59	0.41	0.048
- 5	12.0	11.74	0.26	0.031
- 6	12.0	11.82	0.18	0.021
- 7	12.0	11.80	0.20	0.024
- 8	12.0	11.87	0.13	0.015
- 9	12.0	11.68	0.32	0.038

海洋鋁構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-5.7 富山港 -7.5 m 岸壁における測定結果 (タイロッド)

(ノギスによる)

ロッド No.	延長方向 測定点	外 径 (mm)				ロッド No.	延長方向 測定点	外 径 (mm)					
		①	②	③	平均			①	②	③	平均		
1	1	A	53.2	55.4	54.1	54.2	2	1	A	55.5	55.4	55.6	55.5
		B	53.2	55.5	54.0	54.2			B	55.4	55.1	55.8	55.4
		C	53.4	55.8	54.4	54.5			C	55.2	54.8	54.2	55.1
2	1	A	55.5	55.4	55.6	55.5	2	2	A	55.9	55.4	56.0	55.8
		B	55.4	55.1	55.8	55.4			B	55.8	55.0	56.0	55.6
		C	55.2	54.8	55.2	55.1			C	55.6	55.4	55.6	55.5
3	1	A	55.6	55.0	55.5	55.4	2	3	A	55.9	55.2	55.4	55.5
		B	55.4	55.2	55.4	55.3			B	55.8	55.4	55.0	55.4
		C	55.2	55.4	55.6	55.4			C	55.9	55.2	55.9	55.7
4	1	A	55.0	55.4	55.4	55.3	2	4	A	55.8	55.2	55.9	55.6
		B	55.4	55.4	55.6	55.5			B	55.8	55.0	55.9	55.6
		C	55.4	55.2	55.1	55.2			C	55.8	55.2	55.4	55.5
5	1	A	54.4	55.8	55.0	55.1	2	5	A	54.6	56.0	56.0	55.5
		B	54.0	55.7	55.0	54.9			B	54.6	55.8	56.0	55.5
		C	54.4	55.5	54.8	54.9			C	54.6	55.5	56.0	55.4
6	1	A	54.9	55.2	55.4	55.2	2	6	A	54.9	56.2	56.0	55.7
		B	55.0	55.2	55.9	55.4			B	55.0	56.1	56.0	55.7
		C	55.5	55.4	55.8	55.6			C	54.9	56.0	56.0	55.6
7	1	A	55.5	55.4	55.5	55.5	2	7	A	54.9	56.2	56.2	55.8
		B	55.6	55.8	55.2	55.5			B	55.0	56.1	56.1	55.7
		C	55.4	55.4	55.2	55.3			C	55.0	56.2	56.0	55.7
8	1	A	55.6	56.2	55.8	55.9	2	8	A	55.4	56.0	56.0	55.8
		B	55.9	55.8	55.6	55.8			B	55.4	56.1	56.1	55.9
		C	56.0	56.1	54.6	55.6			C	55.5	56.0	56.2	55.9
9	1	A	55.2	55.4	55.8	55.5							
		B	55.1	55.4	55.6	55.4							
		C	55.0	55.4	55.6	55.3							
平均		55.3	標準偏差	0.6	平均		55.6	標準偏差	0.5				

付表-5.8 北浜港 -4.5m 岸壁タイロッドの外径測定結果

ロッド No.	延長方向 測 定 点		外 径 (mm)				ロッド No.	延長方向 測 定 点		外 径 (mm)			
			①	②	③	平 均				①	②	③	平 均
1	1	A	49.7	49.8	49.7	49.7	2	1	A	50.2	50.2	50.2	50.2
		B	49.4	49.4	49.4	49.4			B	49.7	49.7	49.7	49.7
		C	49.7	49.7	49.7	49.7			C	49.6	49.6	49.7	49.6
1	2	A	50.1	50.1	50.0	50.1	2	2	A	50.0	50.0	50.0	50.0
		B	49.9	49.7	49.8	49.8			B	49.6	49.6	49.6	49.6
		C	50.4	50.4	50.4	50.4			C	49.4	49.5	49.4	49.4
1	3	A	50.2	50.2	50.2	50.2	2	3	A	49.9	49.9	49.9	49.9
		B	49.3	49.2	49.2	49.2			B	49.5	49.4	49.4	49.4
		C	49.9	49.9	49.9	49.9			C	49.4	49.4	49.5	49.4
1	4	A	50.1	50.1	50.1	50.1	2	4	A	50.0	50.0	50.0	50.0
		B	49.0	49.0	49.0	49.0			B	49.1	49.1	49.2	49.1
		C	49.7	49.8	49.8	49.8			C	49.8	49.8	49.8	49.8
1	5	A	49.9	49.8	49.8	49.8	2	5	A	50.2	50.1	50.0	50.1
		B	49.3	49.3	49.3	49.3			B	49.7	49.6	49.7	49.7
		C	49.8	49.8	49.7	49.8			C	49.5	49.5	49.5	49.5
1	6	A	49.9	49.8	49.9	49.9	2	6	A	49.7	49.7	49.6	49.7
		B	49.4	49.4	49.4	49.4			B	50.0	50.0	50.0	50.0
		C	50.2	50.2	50.2	50.2			C	49.4	49.4	49.4	49.4
1	7	A	49.9	49.9	49.9	49.9	2	7	A	49.7	49.7	49.7	49.7
		B	49.0	49.2	49.2	49.1			B	50.0	50.0	50.1	50.0
		C	50.5	50.5	50.5	50.5			C	49.8	49.8	49.7	49.8
1	8	A	49.9	49.9	49.8	49.9	2	8	A	49.6	49.6	49.6	49.6
		B	49.9	49.9	49.9	49.9			B	49.6	49.6	49.6	49.6
		C	50.4	50.4	50.4	50.4			C	49.2	49.2	49.2	49.2
1	9	A	49.8	49.8	49.8	49.8	2	9	A	49.9	49.9	50.0	49.9
		B	49.9	49.9	49.9	49.9			B	49.8	49.9	49.8	49.8
		C	50.2	50.2	50.2	50.2			C	49.3	49.3	49.3	49.3
						2	10	A	49.2	49.2	49.2	49.2	
								B	49.8	49.7	49.8	49.8	
								C	49.4	49.3	49.4	49.4	
平 均 値			49.8	標 準 偏 差		0.381	平 均 値			49.7	標 準 偏 差		0.285

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-5.9 切取りタイロッド片(土中)の外径(ノギスによる)富山港-3.0m物揚場

No.	測定点	外 径 (mm)				No.	測定点	外 径 (mm)				
		①	②	③	平均値			①	②	③	平均値	
0-3	1	31.4	31.5	31.0	31.7	10-3	1	31.2	31.4	31.8	31.8	
	2	31.8	31.4	31.4			2	31.4	31.2	31.3		
	3	31.6	31.8	32.0			3	31.6	31.2	31.0		
	4	32.0	31.2	31.2			4	31.6	31.0	31.0		
	5	32.0	31.9	31.5			5	39.8	30.8	30.5		
	6	31.8	32.0	31.6			6	31.2	31.6	30.9		
	7	32.0	32.0	31.4			7	30.4	31.0	30.6		
	8	31.8	31.8	31.6			8	31.0	31.0	30.6		
	9	31.6	31.6	31.8			9	30.0	31.4	31.0		
0-4	1	32.0	31.8	31.8	31.5	10-4	1	31.4	31.4	31.6	31.5	
	2	32.0	32.0	31.6			2	31.2	31.4	31.6		
	3	31.8	31.8	31.8			3	31.6	31.6	31.6		
	4	31.4	31.2	31.6			4	31.6	31.6	31.8		
	5	31.4	31.4	31.5		25-3	1	31.8	31.7	31.7	31.4	
	6	31.6	30.2	31.4			2	31.6	31.8	31.6		
	7	31.4	31.4	31.2			3	31.7	31.2	31.6		
4-3	1	32.4	32.4	31.9	31.9	4	30.9	31.6	30.2	31.6		
	2	32.0	32.2	31.9		5	31.4	31.6	31.2			
	3	32.0	32.0	31.8		6	31.1	31.4	31.8			
	4	31.6	31.9	32.0		7	31.6	31.6	31.4			
	5	32.0	31.8	31.4		8	31.2	31.2	31.2			
	6	31.8	31.0	31.3		9	31.5	30.8	31.5			
	7	31.9	32.0	32.4		25-4	1	31.6	31.4		31.4	31.6
	8	32.2	31.6	31.6			2	31.6	31.6		31.5	
	9	32.0	31.9	31.8			3	31.4	31.8		32.0	
				4	31.6		31.6	31.2				
4-4	1	31.9	31.8	32.0	31.8	36-3	1	31.6	31.6	32.0	31.8	
	2	32.2	32.4	31.8			2	31.6	32.0	32.4		
	3	31.2	31.1	31.2			3	32.6	32.0	31.8		
	4	31.8	32.0	32.0			4	31.8	32.0	32.0		
					5		31.4	31.4	31.8			
					6		31.6	31.6	31.5			
					7		31.9	32.2	32.0			

付表-6.1 調査鋼矢板の仕様

Type	Section	Code Number	Weight (kg/m)		Width (mm) b	Height (mm) d	Thickness (mm)		Section Modulus (cm ³)	
			per pile	per meter of wall			t ₁	t ₂	per pile	per meter of wall
Larssen		I c	29.6	73.2	405	50	6.5	—	—	257
		I a	32.8	82	400	63	6.6	6	66	380
		I an	36.6	91.4	400	110	7.5	—	—	625
		I	40.0	100	400	75	7.8	7	90	500
		II	48.8	122	400	100	10.5	8	152	849
		II a	45.6	114	400	135	8	7	230	970
		II n	48.8	122	400	135	9.5	—	—	1,100
		III	62.0	155	400	123.5	14.2	8	203	1,363
		III a	57.2	143	400	145	11	8	322	1,400
		III n	62.0	155	400	145	13	—	—	1,600
		IV a	69.0	172	400	180	13	9	374	2,000
		IV	75.0	187	400	155	15.5	9	315	2,037
		IV n	74.0	185	400	1	14.8	—	—	2,200
		V	100	238	420	172	21	11	423	2,962
		V a	92.4	220	420	210	16	10	—	3,000
VI	123	293	420	220	22	13	714	4,170		
VII	142.6	310	460	230	26	—	—	5,000		
Larssen		○○	16.5	50.8	325	35.5	—	4.5	—	117
		X a	60.2	134	450.8	100	—	12.7	—	631
Terres Rouges		I B	27.8	73.2	380	80	6	6	77	203
		I	32	84.3	380	80	7.5	7.5	87	230
		II B	35.4	93.2	380	130	7.5	7.5	154	406
		II	42.8	112.7	380	130	10	9	184	485
		III	51.7	136.1	380	170	12	10	282	744
		III A	55.7	146.6	380	170	12	10	293	770
Klockner		I	29.4	88.2	333	150	6.5	6	200	600
		II	49.5	123.5	400	200	9	8	440	1,100
		II a	53.6	134.0	400	202	10	8	480	1,200
		III	57.2	143.0	400	230	10	8	582	1,455
		III a	68.0	170.0	400	232	12	10	682	1,705
		IV	66.9	178.3	375	270	12	9	787.5	2,100
IV a	75.2	200.0	375	270	14	10	870	2,320		
V	88.4	236.0	375	300	14	10.5	1,125	3,000		
Yawata		I	36.5	91.2	400	75	8.0	6.0	66.4	509
		II	48.0	120	400	100	10.5	7.0	121	869
		III	60.0	150	400	125	13.0	8.0	196	1,310
		IV	76.4	191	400	155	15.5	9.0	311	2,060
		V	105	250	420	175	22.0	10.0	433	3,150
	Yawata		Z 45	116	291	400	360	21.5	12.5	1,820
F			54.2	136	400	45	—	9.5	47.8	120

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-6.2 海水の主要成分 (塩素量 19‰)

	ppm	epm
塩化物 Cl ⁻	18980.0	535.3
硫酸塩 SO ₄ ²⁻	2649.0	55.1
重炭酸塩 HCO ₃ ⁻	139.7	2.3
臭化物 Br ⁻	64.6	0.8
ふっ化物 F ⁻	1.3	0.1
ほう酸 H ₃ BO ₃	26.0	
		593.6
ナトリウム Na ⁺	10556.1	459.0
マグネシウム Mg ²⁺	1272.0	104.6
カルシウム Ca ²⁺	400.1	20.0
カリウム K ⁺	380.0	9.7
ストロンチウム Sr ²⁺	13.3	0.3
		593.6

付表-6.3 標準大気下の空気飽和海水中の溶存酸素量 (ppm)

塩素量(‰)	0	5	10	15	20
塩分(‰)	0	9.06	18.08	27.11	36.11
0°C	14.6	13.7	12.8	11.9	11.0
10°C	11.3	10.7	10.0	9.4	8.7
20°C	9.2	8.7	8.2	7.8	7.2
30°C	7.7	7.3	6.8	6.4	5.4

*) 塩素量 (chlorinity) は海水 1 kg に含まれるハロゲンの合計 g 数, ただし Br, I は Cl に換算する。これに対し, 塩分 (salinity) は海水 1 kg に含まれる全固形物の g 数, ただし炭酸塩は酸化物とし, 有機物は完全に酸化させ, 臭素, 元素は塩素に置換する。両者の間には次の関係がある。

$$\text{塩分} = 1.805 \times \text{塩素量} + 0.03$$

表-6.4 4季による海水組成変化 (1932)

季 節	Sample No.	sp. gr.	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total
冬	1~30	1.024	11.2	8.1	0.14	0.19	0.34	0.07	2.43	2.17
春 (4. 1~ 4.30)	1~30	1.022	15.3	8.2	0.12	0.18	0.30	0.06	2.26	2.92
夏 (7. 1~ 7.31)	1~31	1.021	28.9	8.1	0.12	0.18	0.30	0.06	2.28	2.94
夏 (8. 1~ 8.31)	1~31	1.020	28.3	8.0	0.11	0.17	0.28	0.06	2.13	2.75
秋 (10. 1~10.31)	1~31	1.024	17.8	8.3	0.13	0.20	0.34	0.07	2.46	3.20

付表-6.5 日本の港湾における海水中の溶解酸素測定結果

試 料	溶解酸素量 (ppm)	試 料	溶解酸素量 (ppm)
油津港における海水 (1)	8.63	小倉港における海水 (3)	9.38
油津港における海水 (2)	9.50	門司港における海水 (1)	9.88
志布志港における海水	9.50	門司港における海水 (2)	8.63
串木野港における海水	8.75	下関港における海水 (1)	9.38
七尾港における海水	8.63	下関港における海水 (2)	9.25
新潟港における海水 (1)	8.38	洞海湾における海水 (1)	9.20
新潟港における海水 (2)	10.33	洞海湾における海水 (2)	8.70
小倉港における海水 (1)	10.08	水道水	9.00
小倉港における海水 (2)	9.08	蒸溜水	9.50

善 一 章

付表-6.6 水質試験結果（東京湾総合調査報告書より）

東 京 港

採水地点	採水年月	水温 (°C)	pH	DO (ppm)	COD (ppm)	BOD (ppm)	Cl (%)	SS (ppm)	硫化物 (ppm)	透視度	採水深度 (m)
上流 A	S 35.12	8.0	6.9	2.5			14.70				-3
	S 36.7	27.0	5.8	0			2.93				
	S 37.3	11.5	7.0	0.24			9.72				
上流 A	S 44.1	9.5	7.0	2.40	36.9	21.9	5.55	18		19.0	
	S 44.2	8.8	7.1	2.08	27.0	8.24	4.44	29		8.0	
	S 44.3	9.0	6.8	1.28	32.0	10.3	3.44	27		11.0	
	S 44.4	17.0	6.8	0.12	27.05	13.36	0.30	55		5.0	
	S 44.5	20.0	6.9	0	30.9	16.5	3.63	29		10.0	
	S 44.6	21.6	6.8	0	24.6	15.3	2.45	23		12.5	
	S 44.7	21.5	6.7	0.34	24.2	12.4	0.77	51		6.3	
	S 44.8	27.1	6.8	0.01	22.6	16.2	2.29	17		12.1	
	S 44.9	19.8	6.9	0.60	15.4	9.36	2.02	23		15.0	
	S 44.10	18.0	6.8	0.37	21.4	13.0	1.94	26		14.0	
	S 44.11	16.0	7.0	0.45	17.6	9.23	4.21	20		21.3	
	S 44.12	13.8	7.0	0.76	19.3	14.0	3.54	17		12.3	
下流 A	S 48.	26.0	7.59	3.9	27.5		11.01	7	0	44.2	-2.42
上流 B	S 36.5	22.7	7.0	0			4.00				
	S 37.3	11.4	7.4	1.18			8.56				
下流 B	S 46.5	19.5	<7.6	0.47	8.23	5.08	9.38	7.0		0.8m	-1
	S 46.5	18.1	8.0	2.27	4.78	1.49	13.86	10.9		0.8m	-4
	S 46.8	28.9	8.7	13.00	13.36	7.60	12.94	<5		0.9m	-1
	S 46.8	26.5	8.3	2.74	2.14	2.17	16.43	11.5		0.9m	-5
	S 46.10	18.1	7.6	4.21	3.00	1.85	10.36	<5		1.5m	-1
	S 46.10	20.0	7.6	4.67	0.81	1.47	15.95	<5		1.5m	-5.5
	S 47.2	8.1	7.8	5.97	4.44	5.60	13.51	<5		1.0m	-1
	S 47.2	10.7	8.2	6.92	1.96	0.72	17.51	<5		1.0m	-4
	S 47.2	10.7	8.2	6.87	1.27	0.28	17.87	<5		1.0m	-7.5
対岸 A	S 47.	16.0	7.55	0	3.6		14.84	2	0.5	18.4	+0.65
対岸 B	S 47.	16.5	7.50	0.3	1.5		14.77	5	0.1	21.8	-0.63

付表-6.7 尼崎港第1・第2閘門水質調査

大阪湾環境水質調査資料より

採年月日	気温 (°C)	水温 (°C)	色相	透視度	pH	DO (ppm)	COD (ppm)	BOD (ppm)	SS (ppm)	NH ₄ -N (ppm)	Cl (ppm)	大腸菌群 菌/ml	全鉄 (ppm)	臭気	Fe ²⁺ (ppm)	摘要
S42. 8.23	29.0	27.0	褐色	—	6.5	0.41	7.43	1.78	198	18.40	11.51×10 ³	120,000	8.72	—	—	第1閘門 第2閘門
	29.0	27.0	褐色	—	6.5	1.02	8.46	2.84	224	4.96	12.7×10 ³	—	4.68	—	—	
S42.11. 7	15.4	19.8	褐色	—	6.4	1.71	6.38	8.4	31	12.10	11.84×10 ³	3,500	3.52	—	—	第1閘門 第2閘門
	14.5	20.2	褐色	—	6.4	2.15	6.23	7.5	40	21.00	11.75×10 ³	—	2.32	—	—	
S43. 2. 1	3.5	9.0	灰褐色	—	6.4	1.57	8.55	7.4	230	27.00	11.29×10 ³	1,400	2.44	—	—	第1閘門 第2閘門
	5.0	8.8	灰褐色	—	6.3	1.74	8.12	8.0	76	22.25	11.41×10 ³	—	3.22	—	—	
S43. 7.10	25.2	23.8	淡褐色	14.2	6.7	0.00	7.68	37.3	57	2.35	7.22×10 ³	39,000	—	下水臭	4.32	閘門
S43. 9. 6	31.3	26.6	褐色	11.3	6.3	0.88	1.22	10.0	17	1.82	12.24×10 ³	40,000	—	—	4.72	閘門
S44. 2. 5	2.7	9.4	淡褐色	11.0	6.0	5.59	3.06	7.4	21	1.85	11.56×10 ³	790	—	—	4.00	閘門

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-6.8 尼崎港における水質試験結果

採水 昭和45年

採水地点	干潮	深度 (m)	温度 (°C)			比重	比抵抗 (Ω-cm)	pH	Cl ⁻ (mg/l)	S ⁻⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻⁻ (mg/l)	DO (mg/l)
			1	2	3							
No. 1	干潮	±0.0	11.7	14.0	17.4	1.021	11.1	5.95	14,357	0.16	2,092	7.0
		-0.5	12.0	13.0	16.6	1.021	10.9	5.85	14,269	0.27	1,897	3.3
		-1.0	11.2	13.0	17.6	1.021	12.2	5.90	14,091	0.24	1,903	2.2
		-4.0	12.1	14.0	18.2	1.021	10.5	6.00	14,800	±	2,047	3.6
	満潮	±0.0	10.0	13.0	17.5	1.021	12.2	6.05	14,180	0.24	2,213	4.0
		-0.5	11.0	13.0	17.4	1.021	12.2	6.35	14,357	±	2,365	4.1
		-1.0	11.0	12.0	17.3	1.021	12.2	6.20	14,446	0.16	2,098	3.1
		-4.0	12.0	13.0	17.3	1.022	9.1	6.35	16,484	±	2,312	5.3
No. 2	干潮	±0.0	12.0	14.0	17.2	1.022	15.4	6.15	13,471	0.16	2,322	3.7
		-0.5	12.0	13.0	16.8	1.020	16.1	6.15	13,117	0.16	2,293	3.3
		-1.0	12.0	13.0	17.4	1.020	14.3	6.20	13,826	0.16	2,041	3.0
		-4.0	12.0	13.0	17.0	1.020	14.7	6.00	14,004	0.16	2,291	3.0
	満潮	±0.0	11.0	14.0	16.9	1.022	18.2	6.30	12,053	0.40	1,963	4.4
		-0.5	10.6	12.0	17.2	1.018	19.2	6.40	12,230	0.11	1,889	2.4
		-1.0	11.0	12.0	17.0	1.021	15.4	6.40	13,382	±	2,006	3.4
		-4.0	11.5	13.0	16.8	1.021	11.8	6.20	14,269	0.24	2,084	5.2
No. 3	干潮	±0.0	12.0	14.0	16.8	1.016	26.3	6.20	9,749	0.32	1,572	2.5
		-0.5	12.0	12.0	16.9	1.015	25.0	6.10	9,749	0.32	1,757	0.9
		-1.0	12.0	13.0	17.2	1.016	25.0	6.45	9,660	0.48	1,755	1.9
		-4.0	12.5	14.0	17.0	1.020	14.7	5.80	13,294	±	2,345	2.5
	満潮	±0.0	11.0	13.0	16.7	1.014	26.3	6.30	9,749	0.24	2,127	1.6
		-0.5	12.0	12.0	17.2	1.017	26.3	6.10	9,926	0.24	1,829	0.4
		-1.0	12.1	13.0	16.9	1.016	25.0	6.10	9,926	0.27	1,702	6.7
		-4.0	12.0	15.0	17.3	1.021	13.3	5.90	13,648	±	2,383	4.1
No. 4	干潮	±0.0	12.5	16.0	17.8	1.015	28.6	6.15	8,951	0.32	1,434	3.7
		-0.5	12.8	13.0	18.3	1.013	28.6	6.05	8,508	0.32	1,233	0.5
		-1.0	12.5	15.0	17.8	1.012	25.0	6.00	9,040	0.43	1,286	4.9
		-3.0	12.2	15.0	16.8	1.016	25.0	6.00	10,281	0.56	2,028	3.0
	満潮	±0.0	12.8	15.0	17.3	1.013	31.3	6.10	8,508	0.32	1,325	3.4
		-0.5	12.8	12.0	17.5	1.014	28.6	6.10	8,154	0.40	1,328	2.7
		-1.0	13.0	15.0	18.1	1.016	26.3	6.10	9,128	0.32	1,332	3.3
		-3.0	12.2	15.0	16.8	1.016	22.2	6.00	10,281	0.56	2,028	3.2
No. 5	干潮	±0.0	12.0	13.0	16.5	1.012	33.3	6.20	7,622	1.04	1,299	0.2
		-0.5	12.2	15.0	16.8	1.011	35.7	6.05	8,100	0.80	1,350	1.9
		-1.0	12.5	15.0	16.8	1.014	31.3	6.00	8,331	0.88	1,217	1.3
		-3.0	13.5	12.0	16.7	1.015	20.0	6.15	11,078	1.04	1,589	0.4
	満潮	±0.0	12.2	15.0	16.6	1.012	40.0	6.20	7,090	1.28	1,200	1.2
		-0.5	12.2	13.0	16.7	1.011	35.7	6.15	7,888	1.28	1,099	0.3
		-1.0	12.7	12.0	16.8	1.016	31.3	6.10	8,278	0.91	1,153	0
		-3.0	12.5	16.0	16.8	1.018	16.7	6.00	11,876	1.36	1,642	0

温度 1: 採水時の温度

温度 2: DO 測定時の温度

温度 3: DO 以外の項目 測定時の温度

付表-6.9 底質試験結果（東京湾総合調査報告書より）

東 京 港

採泥地点	採泥年月	採泥深度 (m)	泥色	臭気	泥温 (°C)	強熱減量 (乾泥%)	COD (mg/g)	硫化物 (mg/g)	硫酸塩* 還元菌数/g
対岸A(1)	S 47.	-1.15~-1.65	黒	フブ臭	16.0	10.4	49.96	1.74	
	S 47.	-1.65~-2.15	〃	〃	16.0	11.0	36.33	1.02	
	S 47.	-2.65~-3.15	〃	〃	16.8	8.9	24.08	0.55	
	S 47.	-3.65~-4.15	暗灰	無臭	16.8	6.9	12.66	0.03	
対岸A(2)	S 47.	-2.31~-2.81	黒	フブ臭	17.5	15.6	58.29	6.63	
	S 47.	-3.31~-3.81	〃	〃	18.0	9.5	39.96	1.78	
	S 47.	-3.81~-4.21	暗灰	無臭	17.5	7.7	37.88	0.03	
対岸B	S 47.	-1.63~-2.13	黒	フブ臭	19.5	14.2	57.48	9.04	
	S 47.	-2.13~-2.63	暗灰	無臭	19.5	5.3	6.38	0.05	
	S 47.	-3.13~-3.63	〃	〃	20.0	4.5	6.02	0.03	
	S 47.	-4.13~-4.63	〃	〃	21.0	6.0	10.73	0.08	
	S 47.	-5.13~-5.63	〃	〃	21.0	5.8	11.34	0.08	
下流A	S 48.	-2.52~-2.72	黒	フブ臭	18.5	9.6	1.72	0.34	
	S 48.	-3.42~-3.62	緑灰	無臭	18.0	4.1	15.46	0.07	
	S 48.	-5.32~-5.52	黄褐	〃	17.0	3.2	12.02	0.06	
下流B	S 46.5								4,900
	S 46.8								1,200
	S 46.10								400
	S 47.2								25

* cells/g (湿泥)

海洋鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策

付表-7.1 カテゴリー数量
外的基準が2分類(a, bとc)のケース

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量	アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量
1	1	0.0	7	1	0.0
	2	-0.00448		2	-0.00330
	3	-0.03172		3	-0.02139
2	1	0.0	8	1	0.0
	2	0.00013		2	-0.01489
	3	0.01099	9	1	0.0
3	1	0.0		2	0.00176
	2	-0.00006	10	1	0.0
4	1	0.0		2	-0.01042
	2	-0.00597		3	-0.00878
5	1	0.0	11	1	0.0
	2	-0.00196		2	-0.00610
	3	-0.00371	12	1	0.0
	4	-0.01948		2	-0.00450
	5	-0.01641		3	0.00701
	6	-0.01871		4	0.00652
6	1	0.0		5	0.00323
	2	-0.00663		6	-0.01027
	3	-0.01741	7	-0.01471	
			8	-0.00417	