

港灣技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 501 Dec. 1984

港灣鋼構造物腐食評価手法について

石 横 清 片 安 白 外 柿	渡 井 宮 岡 間 石 山 川	友 聡 真 修 進 英	夫 之 理 二 清 章 一 明
--------------------------------------	--------------------------------------	----------------------------	--------------------------------------

運輸省港灣技術研究所



正 誤 表

頁	行	原 文	訂 正
15 16	右上 7 図-12	この図から、 <u>3</u> 分割のケース(C-4)で a) 注4) ↓ <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> 杭の横方向ばね定数 $(K_H, y_{top}/H)_i$, 注1) 単位 杭頭モーメント $(M_{top}/H)_i$ の算定 ω_{i1} </div>	この図から、 <u>4</u> 分割のケース(C-3)で a) 注4) ↓ <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> 杭の横方向ばね定数 $(K_H, H/y_{top})_i$, 注1) 単位 杭頭モーメント $(M_{top}/H)_i$ の算定 ω_{i1} </div>
17	右下 15	より、 y_{top}/H 及び M_{top}/H (注) を求め、	より、 H/y_{top} 及び M_{top}/H (注) を求め、
17	右下 1	a) 杭の横方向ばね定数 $(K_H, y_{top}/H)$,	a) 杭の横方向ばね定数 $(K_H, H/y_{top})$,
18	左上 19 20	$(y_{top}/H)_i$ 及び $(M_{top}/H)_i$ を算定する。	$(H/y_{top})_i$ 及び $(M_{top}/H)_i$ を算定する。
18	左下 12	杭の横方向ばね定数 $(K_H, y_{top}/H)$ を	杭の横方向ばね定数 $(K_H, H/y_{top})$ を
22	図-18	(地盤条件説明) $k_w=6000$ (tf/m)	$k_w=6000$ (tf/m ³)
33	図-30	(タイトル) 補修杭が他の杭の応力に及ぼす影響(3)	補修杭が他の杭の応力に及ぼす影響(3) (地震時; 震度 0.2)
33	図-30	(説明文)	
		注) 1. σ_{ij} は, CASE の補修時に	注) 1. σ_{ij} は, CASE <u>i</u> の補修時に
44	右上 2	$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y = 0$	$EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y_2 = 0$

目 次

要 旨	3
まえがき	3
1. 総 論	3
1.1 目 的	3
1.2 適用の範囲	4
1.3 利用上の注意	4
2. 腐 食 調 査	4
2.1 調査計画	4
2.2 目視観察	6
2.3 肉厚測定	7
2.4 電気防食調査	11
3. 鋼杭式構造物の発生応力	12
3.1 一 般	12
3.2 腐食形態	12
3.3 腐食量の設定	14
3.4 杭のモデル化	14
3.5 直杭式横棧橋の発生応力の計算	15
3.6 斜め組杭式横棧橋の発生応力の計算	23
4. 鋼矢板式構造物の発生応力	25
4.1 一 般	25
4.2 腐食形態	25
4.3 腐食量の設定	26
4.4 発生応力の計算	26
5. 健全度の評価	27
5.1 鋼杭式構造物の健全度の評価	27
5.2 矢板式構造物の健全度の評価	27
6. 腐食対策工	27
6.1 一 般	27
6.2 腐食対策調査	28
6.3 補修工法の選定	29
6.4 部材の補修個所の決定	29
あ と が き	33
参 考 文 献	33
付 録	35

Estimation System of Corrosion of Port Facilities

Tomoo ISHIWATA¹⁾
Tosiyuki YOKOI²⁾
Osamu KIYOMIYA³⁾
Shinji KATAOKA⁴⁾
Kiyosi AMMA⁵⁾
Nobuaki SIRAI⁶⁾
Shin-ichi TOYAMA⁷⁾
Hideaki KAKIGAWA⁸⁾

Synopsis

Steel materials of port facilities suffer corrosion. Some facilities are in an advanced stage of corrosion. The stability of damaged facilities should be estimated to repair them. There is little amount of available information on estimation of corrosion. This paper describes the estimation system of it.

The contents of the paper are as follows.

1. General
2. Corrosion survey
3. Analysis of piled wharves
4. Analysis of sheet pile type structures
5. Estimation of stability
6. Repair works

-
- 1) Director of Design Standard Division
 - 2) Chief of Materials Laboratory, Structures Division
 - 3) Chief of Subaqueous Tunnels and Pipelines Laboratory, Structures Division
 - 4) Chief of Design Standard Laboratory, Design Standard Division
 - 5) Senior Research Engineer, Design Standard Division
 - 6) Member of Design Standard Laboratory, Design Standard Division
 - 7) Chief of Automatic Design Laboratory, Design Standard Division
 - 8) Chief of System and Programming Branch, Computer Center

港湾鋼構造物腐食評価手法について

石渡 友夫¹⁾ 横井 聡之²⁾
清宮 理³⁾ 片岡 真二⁴⁾
安間 清⁵⁾ 白石 修章⁶⁾
外山 進一⁷⁾ 柿川 英明⁸⁾

要 旨

港湾構造物で使用している鋼材は、一般に腐食の影響を受けるが、一部の施設では設計・施工時に予測したよりもかなり腐食が進行しているものもあり、適切に調査及び評価を行い、対策を施す必要がある。本資料は腐食評価を担当する技術者の指針となるよう、腐食に関する現在までの研究成果及び知見をとりまとめたものであり、鋼材の腐食調査方法、鋼杭式構造物及び鋼矢板式構造物の発生応力の計算方法、腐食が進行した施設の健全度の評価方法、及び対策工検討の基本的考え方より構成されている。

まえがき

近年、港湾構造物に使用されている鋼材の腐食に関する問題が顕在化し、社会資本としての港湾施設の機能が減少したり、耐用年数を縮小させる等の事態が発生している。特に昭和40年代に建設された栈橋等の施設については、設計・施工時に想定した以上に腐食が進行しているものもあり、一部の施設においては機能発揮上にも支障をきたし、供用の停止を検討している状況にある。

これらの腐食が進行している港湾施設においては、機能保全のため適切な対策を実施する必要がある。しかし、従前、腐食が進行した港湾構造物の評価方法について体系的にとりまとめられたものがなく、腐食対策を行うにあたっては指針となるべきものが必要となる。

このような要請に対処するため、本稿は現在までの研究成果及び知見を、港湾構造物の腐食調査法、応力解析法、健全度の評価法等に関するマニュアルとしてとりまとめたものである。

1. 総 論

1.1 目 的

本資料は、既設の港湾鋼構造物の腐食対策に関する腐食調査、評価及び対策工の設計の合理化並びに能率化に寄与することを目的とするものである。

〔解 説〕

(1) 港湾構造物で使用している鋼材は、一般に腐食の影響を受ける。この腐食の程度は、一般に海水及び大気と接している部分特に干潮面付近で著しく、土中やコンクリート中では小さい。この海水及び大気と接している部分の腐食は、設計の時点で予測したよりもかなり大きいこともあり、適切に調査を実施し対策を行う必要がある。

近年、鋼材の腐食及び腐食の調査法、解析法については多くの研究成果及び知見が得られており、また、対策工法についてもいくつかの提案がなされているが、鋼構造物の腐食対策のためには、これらの研究成果及び知見

1) 設計基準部長
3) 構造部 沈埋構造研究室長
5) 設計基準部 主任研究官
7) 設計基準部 自動設計研究室長

2) 構造部 材料施工研究室長
4) 設計基準部 設計基準研究室長
6) 設計基準部 設計基準研究室
8) 計算センター プログラム開発室長

に関する幅広い知識と高度の技術が必要である。このため、これらの研究成果及び知見をもとに、現在標準的と考えられている港湾鋼構造物の腐食対策技術について体系的にとりまとめを行い、既設の港湾鋼構造物の腐食対策に役立たせるべきマニュアルとして本資料が作成された。

本資料は、腐食対策のための調査、解析、評価及び対策の一部についてとりまとめたものである。

(2) 港湾法56条の2によれば、港湾の施設は、他の法令の規定のほかに運輸省令で定める港湾の施設の技術上の基準に適合するように建設し、改良し、または維持しなければならないことになっている。本資料は技術基準の内容をさらに具体的かつ詳細に示したものである。

1.2 適用の範囲

本資料は、既設の鋼杭式及び鋼矢板式港湾構造物の腐食対策に適用する。本様式以外の鋼構造物についても、構造様式の違いを適切に考慮して、本資料を準用することができる。

〔解説〕

本資料は、鋼材の腐食が構造物の安定に及ぼす影響の特に大きい鋼杭式及び鋼矢板式港湾構造物の腐食対策についてまとめたもので、本様式以外の鋼構造物に適用するに当たっては、構造様式の違いによる腐食の進み方の相違、腐食の構造物の安定に及ぼす影響、対策工法の違い等を適切に考慮する必要がある。

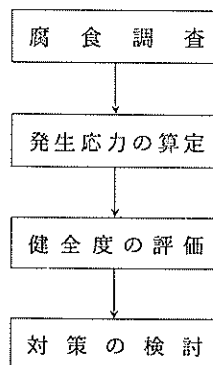
1.3 利用上の注意

〔解説〕

(1) 本資料は、現在の技術で標準的と考えられる港湾鋼構造物の腐食対策技術についてとりまとめたものであり、腐食対策の研究、実施により、今後新しい技術的成果が順次得られてくると考えられる。したがって、設計者は本資料のみに拘泥することなく、新しい技術成果を検討し、自らの判断で最適の対策とする努力が必要である。

(2) 本資料はできるかぎり多くの現場に適用できるように考慮して作成されている。しかしながら、あらゆる現場にそのまま適用できるような技術的とりまとめは不可能であり、どうしても一般的とならざるを得ない。したがって、単に盲目的に本資料に従うと、それぞれの現場の特殊性を見落してしまい、不適当な対策を行うおそれがある。本資料の活用にあたっては、資料の内容を十分理解し、現場の条件を適確に見定めて検討する必要がある。

(3) 港湾鋼構造物の腐食対策は一般に次の順序で行う。



2. 腐食調査

2.1 調査計画

2.1.1 調査の分類

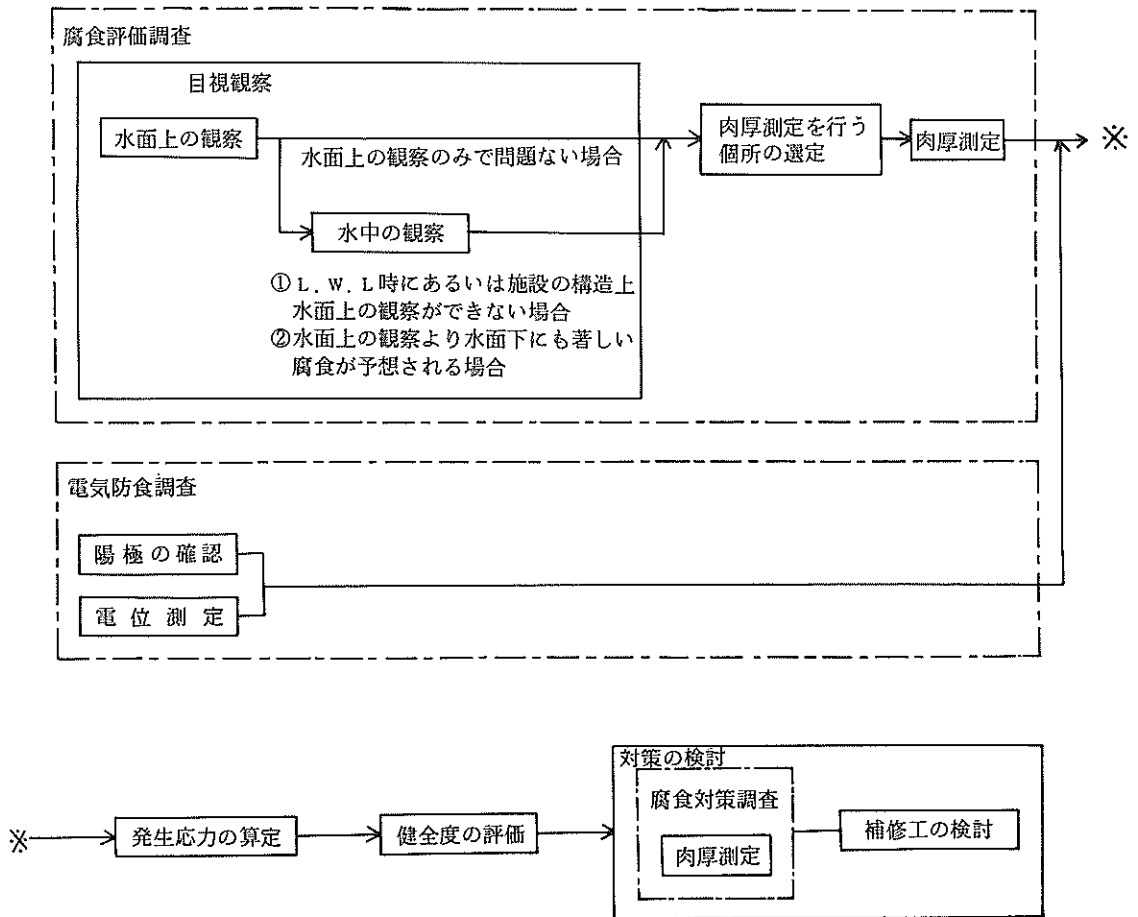
本資料においては、腐食調査をその目的により次のように分類する。

- ① 腐食評価調査…既設構造物の腐食状態を把握し、健全度を検討するための調査
- ② 電気防食調査…電気防食を行っている構造物に対して、電気防食が有効に作用しているか否かを確認するための調査
- ③ 腐食対策調査…腐食のため対策が必要な構造物に対し、対策工法の設計のために行う調査

〔解説〕

本資料における腐食調査には、既設構造物が腐食による鋼材断面の減少のため、その健全度を現在あるいは供用期間内に保ちうるか否かを検討するために行う調査、すなわち腐食の状態を把握する調査（腐食評価調査）及び電気防食を行っている構造物に対する電気防食が有効な状態にあるか否かを確認するための調査（電気防食調査）と、それに基づく健全度の検討の結果、対策が必要な場合、その設計のために行う調査（腐食対策調査）よりなる。（図-1参照）

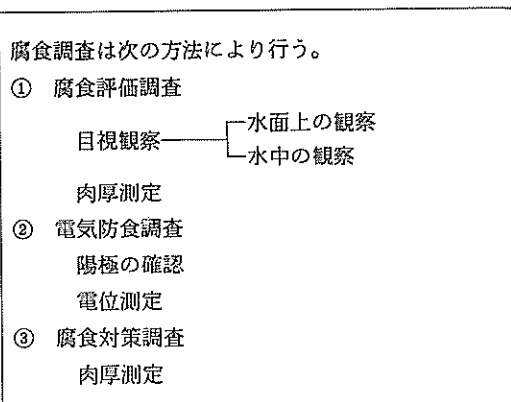
調査の目的により調査方法、調査対象範囲、調査の密度等が異なってくる。腐食評価調査においては、まず施設全体の腐食の概況を把握し、次いで例えば最大応力の発生個所のように構造物にとって設計上クリティカルになる個所の調査を行うが腐食対策調査においては対策を講ずる区間の決定、対策工法の設計のために一般には更に詳細な調査を行うことになる。



図一 腐食調査の順序

電気防食を行っている施設に対しては腐食評価調査及び電気防食調査を行い、鋼材の状態及び電気防食の状態を評価する。

2.1.2 調査方法



〔解説〕

(1) 鋼材の腐食の調査方法には目視観察と、肉厚測定がある。目視観察では簡易におおよその腐食の状況を把握できるが、腐食量を定量的に知るには肉厚測定によるなければならない。

腐食評価調査においては、目視観察により、施設全体の腐食の状況を把握し、構造物の健全度の検討に必要な個所の現在肉厚を肉厚測定により知る。

構造物の健全度の検討の結果、何らかの対策を講ずる必要があると判明した場合は、腐食対策調査において対策工法の設計のために必要な個所の肉厚測定を行うものである。

(2) 目視観察の対象には水面上の部分と水中部分があり、調査方法が異なる。水面上の観察は船上から行い、水中の観察は潜水夫により行う。

(3) 肉厚測定は、厚み計（超音波探傷式厚み計）により鋼材の現在肉厚を測定するものである。

(4) 電気防食調査では、構造物の電位測定を行い、防食電位に保たれているか否かを確認するとともに流電陽極方式の陽極の有無を潜水夫により確認する。

2.1.3 調査計画に係わる要件

調査計画の作成にあたっては必要に応じて次の要件を考慮しなければならない。

- ① 調査の目的
- ② 構造形式
- ③ 構造物の解析方法
- ④ 腐食の状況
- ⑤ 防食工の状況
- ⑥ 建設後の経過年数
- ⑦ 対策工法の設計法
- ⑧ 調査実施可能時期
- ⑨ 計測器（超音波探傷式厚み計、電位測定計器）の調達
- ⑩ 施設の稼働状況

〔解説〕

(1) 調査方法、調査箇所、調査時期などの調査計画の作成にあたっては必要に応じて上記のような要件を考慮しなければならない。2.2～2.4において標準あるいは参考を示している事項もあるが、あくまで標準あるいは参考であって調査対象施設の条件に応じて適宜定めなければならない。

また、調査の過程においても状況に応じて以後の調査計画の変更が必要となることもある。

(2) 調査目的により調査の項目及びその内容も異なる。例えば腐食評価調査においても腐食対策調査においても肉厚測定が行われるが、肉厚測定を行う箇所は異なる。腐食評価調査においては、構造形式により測定する箇所はほぼ定まるが、腐食対策調査においては個々の事例ごとに、肉厚を知る必要のある箇所を検討して選定しなければならない。

(3) 構造物の形式によって調査の重点をおく箇所が変わってくる。構造物における応力の分布、腐食により生じうると想定される状況（例えば矢板の孔あきによる裏埋土の流出など）、構造形式による腐食傾向の特徴（例えば海側に凸の矢板が凹の矢板より腐食が進行することが多いなど）などを考慮する必要がある。

また、栈橋の杭を栈橋法線方向に一定とするか変化させるか、あるいは部材を腐食に応じて変断面とするか、一様断面とするかなど構造物の解析の方法にも関係する。

(4) 肉厚測定を行う箇所は目視観察の結果に基づき腐

食の状況に応じて選定する。また腐食が進行している構造物については危険な状態を見落とすことのないように調査箇所を密にし入念な調査を実施しなければならない。

(5) 構造物の建設後の経過年数が高いほど腐食が進行するのは当然で、腐食速度は小さくても腐食量は大きくなるので経過年数に注意しなければならない。

(6) 電気防食調査（流電陽極方式）における陽極の確認においては陽極の設計寿命と経過年数に注意して消耗の程度を観察しなければならない。

(7) L.W.L付近まで潮位が下がることがない場合は水中の観察を併用しなければならないなど調査時期により調査方法が変わることがある。

(8) 超音波探傷式厚み計は現有台数が少ないから、調査時期に厚み計が調達できるかどうか注意しなければならない。

(9) 船舶の接岸など施設の稼働状況と調整して調査を実施しなければならない。

2.2 目視観察

2.2.1 水面上の観察

(1) L.W.Lあるいはそれに近い低潮位時に、水面上の鋼材部分を目視により観察し、写真撮影を行う。低潮位時に実施できない場合は水中の観察を併用しなければならない。

(2) 観察範囲は、観察可能範囲全域とする。

(3) 目視による観察においては、①孔の発生の有無、発生の箇所及び孔の形状、寸法、②赤橙色のさびのある箇所の有無、範囲、③付着物の状況、④船舶や漂流物の衝突の痕跡等を観察あるいは測定し、記録する。

(4) 一施設あたり数か所L.W.Lから平均干潮面付近の付着物を除去して観察する。この際、付着物除去面をハンマでたたいて凹みが発生しないか否かを確認する。

(5) 写真は、施設全体の状況が把握できるように法線前面より法線方向10～20m程度の範囲が1枚の写真に入るように法線全長にわたって撮影する。細部の写真については、孔が発生している箇所は代表例について数箇所、またさびている箇所については、肉厚測定の調査地点の候補となると考えられる箇所を、孔、さびの状況、付着物がよくわかるように撮影する。なお写真撮影箇所の位置、撮影時の潮位を記録する。

〔解説〕

(1) 鋼材の腐食の激しい部分は、H. W. L付近以上の飛まつ帯及び平均干潮面付近～L. W. L付近の部分である。

後者は平均干潮面付近～L. W. L付近をアノード（陽極）とし、平均水面付近をカソード（陰極）とするマクロセル（腐食電池）が発生し、平均干潮面付近～L. W. L付近から腐食電流が流出することによるマクロ腐食である。これは常に発生するわけではないが発生した場合は、海水中の標準的な腐食速度の数倍に達する集中腐食を生じることがある。したがってこれを発見するために水面上の観察はL. W. L時に行わなければならない。

水面上の観察では、一般に船上より、施設前面側を観察するが、栈橋の場合は、可能な限りスラブの下にも入って後列の杭や土留矢板を観察する。

(2) 施設の構造上、水面上の観察では、観察できない部分や、L. W. Lは時期や時刻が限定されるので、L. W. L時には観察できない場合は、水中の観察により、L. W. L付近を観察しなければならない。

(3) 鋼材に孔が発生している場合はもちろんであるが、赤橙色のさびがある場合、特に平均干潮面～L. W. Lにかけて、法線方向にも連続してある場合は集中腐食をおこしている可能性がきわめて高いので、目視観察においては、赤橙色のさびの有無および状態がポイントである。

(4) 付着物がある場合は、一般には付着物が鋼材をカバーして酸素の到達をさまたげるため腐食の進行はゆるやかであり、また付着物が生息できる水質環境であることを示しているが、付着物は時期により脱落と付着をくりかえすことがあるので、一施設あたり数箇所は付着物を除去して鋼材面を観察することとする。鋼材面をハンマでたたくのは付着物除去面に限らずさび面や一般の部分に対しても行い凹の発生や手応えをみるのがよい。

(5) 木材等で鋼材表面をこすられると、付着物やさび層がはく離し、腐食の進行がはやまるので、施設がそのような環境にあるか否か注意しなければならない。

(6) 法線方向10～20mごとに写真をとるのは、赤橙色のさびの状態がよくわかるためであるが、施設の全容を撮影しておくことは、全体を把握するとともに後年再び調査する場合の参考にもなる。

孔の発生や腐食の激しい箇所は接近して撮影する。孔の発生箇所が少ない場合は全部撮影するものとする。

2.2.2 水中の観察

(1) 水面下及び栈橋の後列や土留矢板等であって水面上の観察が不可能な箇所に対しては、潜水夫に

よる観察を行う。水面上の観察において、L. W. Lから平均干潮面付近に赤橙色のさびがないなどの状況でかつ構造物の経過年数、構造形式等より、水面下に問題ないと推定できる場合は省略することができる。

(2) 水面下の鋼材面の観察範囲は-2m以浅としL. W. L以下まで鋼材が被覆されている場合は、被覆工下端より2mの深さまでとする。ただし、孔の発生など腐食が著しい場合はさらにそれ以深についても観察する。

また、-2m以深であっても、砂、漂流物などにより定常的に摩耗されるおそれのある場合は、その部分を観察するものとする。

(3) 観察の要領は2.2.1(3)に準ずる。孔があいているなど腐食が著しい場合は写真撮影を行う。

〔解説〕

L. W. L付近に集中腐食が生じている場合は-1m付近まで腐食が進んでいることがある。また、被覆部下端より1m程度までに集中腐食が生じていることがある。そのため潜水調査を行う場合の観察範囲を-2mまで、または被覆工下端より2mとした。腐食状況によってはさらに深くまで観察する。

鋼材表面が摩擦をうけると、さび層がはく離し、腐食の進行がさらにはよくなる。したがって海底砂の舞い上がりや移動、流木等の漂流物などによりくりかえし摩擦をうける部分については水深にかかわらず観察する必要がある。

2.3 肉厚測定

2.3.1 一般

(1) 肉厚測定においては、調査の目的に応じて肉厚測定を行う箇所を適切に選定する。

(2) 本資料においては、肉厚測定を行う箇所の名称を次のように呼ぶものとする。

① 肉厚測定点…肉厚を表示する点、1肉厚測定点においては数点に厚み計の探触子をあてて肉厚を測定し、それらの平均値をその肉厚測定点の肉厚とする。部材水平面内に1ないし数点の肉厚測定点をとる。

② 測定箇所…肉厚測定点の部材の鉛直方向での位置を表した点

③ 調査地点……測定箇所を施設の法線上に平面的に表した点

〔解説〕

(1) 肉厚測定は腐食評価調査及び腐食対策調査で行われる。

調査の目的すなわち腐食評価調査であるか、腐食対策調査であるかにより、肉厚測定を行う箇所が異なってくる。2.3.2～2.3.6においては腐食評価調査について述べ、その標準を示した。腐食対策調査については、6.2に述べる。

(2) 調査地点は、腐食の状況を表すとともに、健全度の検討を行う場合の施設を代表する点である。

測定箇所は、部材の鉛直方向の腐食の分布状態を表す点である。

肉厚測定点の測定値は測定箇所の断面形状を与える。

2.3.2 調査地点の選定

(1) 目視観察の結果より、孔の発生、赤橙色のさびの範囲などの腐食の状態、施設の建設後の経過年数、防食の状況、鋼材の初期肉厚等を考慮して、肉厚減少が著しいと推定される箇所を重点に調査地点を選定する。

(2) 腐食評価調査においては、目視観察の結果より腐食状態が法線方向にかなりの区間はほぼ一様な場合は、その区間に対して、次を参考に調査地点を選定してよい。

① 孔の発生あるいは平均干潮面付近からL.W.L付近にかけて広範囲に連続して赤橙色のさびがみられる状態であって建設後5年以上経過している場合は法線方向約20mに1点。

② 平均干潮面付近からL.W.L付近において赤橙色のさびが部分的にみられる状態であって、建設後10年以上経過している場合は、法線方向約50mに1点。

③ ①②以外の場合、すなわち平均干潮面付近からL.W.L付近において赤橙色のさびがごく部分的か、またはみられない場合、および①あるいは②の腐食状態であっても、建設後の経過年数が短い場合は法線方向約100mに1点。

腐食状態の区分について判断し難い場合は、腐食の激しいほうの区分とするのがよい。また、②及び③の場合においても肉厚判定の結果、腐食が著しいことが判明し、対策を講ずる必要が予想される場合は、①の場合と同様に法線方向

約20mに1点調査地点を追加するものとする。

なお一施設あたり最低2地点とすることが望ましい。

(3) 栈橋の場合、1調査地点は法線直角方向1列のくい群を対象とする。

〔解説〕

(1) 調査地点は、施設の腐食状況を表す代表点であると同時に健全度を検討する地点であるから、腐食が激しく対策が必要となる可能性が大きいほど密に選定するのがよい。

腐食評価調査において最も腐食が進んでいると考えられる場合(2)の①に約20mに1点としたのは、栈橋1ブロック相当分を単位に検討するのが実際的と考えられるからである。①以外の区分において間隔を広げたのは対策を講ずる必要があるほど腐食が激しい可能性が①より小さいので、調査の経済性を考慮したためである。したがって肉厚測定の結果、目視観察に基づいて判断したよりも腐食が進行しており対策を講ずる必要が生じるかもしれないと予想される場合は、①と同様の調査の密度になるように調査地点を追加しなければならない。

(2) 本文(2)において目視観察の結果から腐食状態がどの区分に属するのか判断する場合は付録の写真を参考にするのがよい。判断に迷う場合は腐食の激しいほうの区分とするのがよい。

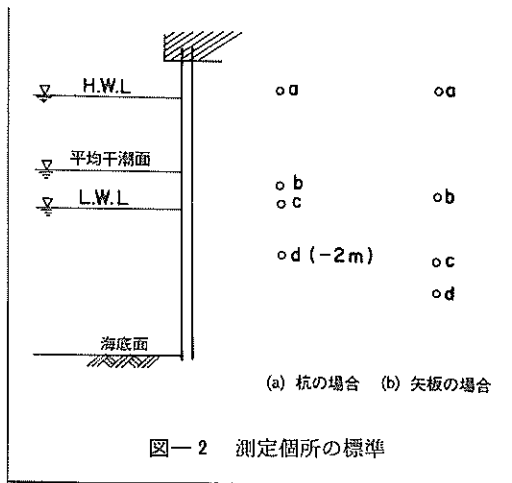
(3) 栈橋の場合、健全度の検討に当たっては、各杭は腐食状況に応じてその断面をそれぞれ定めるから1調査地点においては法線直角方向1列のすべての杭の肉厚を測定しなければならない。

(4) 鋼矢板セル及び鋼板セル式係船岸の場合はセル本体と杭それぞれについて調査地点を選定する。セル本体についてはセルの基数を単位に選定するのがよい。セル本体よりも杭の腐食が著しい例があるので、腐食の状態によってはセル本体と杭との調査地点数を変える必要がある。

2.3.3 測定箇所の選定

(1) 測定箇所は部材の腐食の状態とともに、応力の分布状態等を考慮して選定する。

(2) 腐食評価調査においては、図-2を標準として測定箇所を選定する。



〔解説〕

(1) 測定個所は集中腐食が生じているかなど腐食の形態がわかるように選定しなければならない。また、最大応力発生点のように構造物の安全上問題となる点を選定しなければならない。

腐食の激しい部分は、H.W.L.付近以上と平均干潮面付近～L.W.L.付近であるが、栈橋杭においてはそれらの部分は応力の大きい個所であり、矢板構造においては応力は小さいが、孔が発生した場合裏埋め土砂の流出を生じるので、いずれも肉厚測定を行わなければならない。

(2) 一施設のうち1調査地点については、調査個所の選定及び腐食形態把握の参考とするため調査個所を密にし、初めに調査を行うことが望ましい。

(3) 図一 2 において測定個所を4点とったのは次の理由による。

杭の場合、a点は杭の最上部であり応力が大きい個所であるとともにH.W.L.付近以上では腐食量も大きいからである。b、c点は応力も大きい集中腐食が生じる個所であり、この部分の断面剛性が構造物の応力解析をする際に大きく影響するからである。なおb、c2点とったのは最大腐食量をできるだけつかまえるためである。したがってb、c点は平均干潮面付近からL.W.L.付近のさびの状況より最も腐食していると思われる個所を選定する。

ただし、状況によっては、この部分の測定個所を増減してよい。すなわち潮差が非常に大きい場合や、著しい腐食の範囲が広い場合などは測定個所を増すのがぞましく、逆に日本海側のように潮差が小さい場合はこの部分の測定個所を1点としてよい。

海中部はL.W.L.付近で集中腐食を生じている場合でも-2mより以深では腐食速度はあまり変化しないこと、

応力解析におよぼす影響の小さいことからd点を-2mにとることとした。

(4) 次に矢板においては、H.W.L.付近や平均干潮面付近～L.W.L.付近は応力は小さいが、腐食が進行し孔があいた場合は裏埋土の流失がおきるので測定個所とする。したがってb点は平均干潮面付近～L.W.L.付近間の目視観察より最も腐食していると思われる個所を選定する。

最大応力は海中部で発生するから、最大腐食量を把握するため海中部は2点とることとする。

矢板式構造においては設計上の最大曲げモーメント発生点付近に、セル構造の場合は引張応力が最大となる海底面付近にとる。なお、2点の間隔は鉛直方向に0.5～1m離すのがよい。

(5) 図一 2 においてa点は被覆工下端がH.W.L.以下の場合には被覆工下端直下を測定個所とする。ただし被覆工下端がM.S.L.以下で平均干潮面に近い場合は省略してよい。

また、被覆工下端がL.W.L.以下の場合には被覆工下端直下付近を測定個所とする。

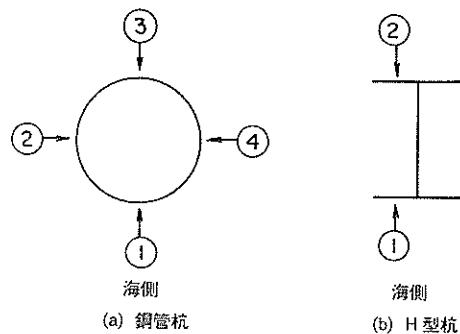
(6) 測定個所は標高でも表示しておくものとする。

2.3.4 肉厚測定点の選定

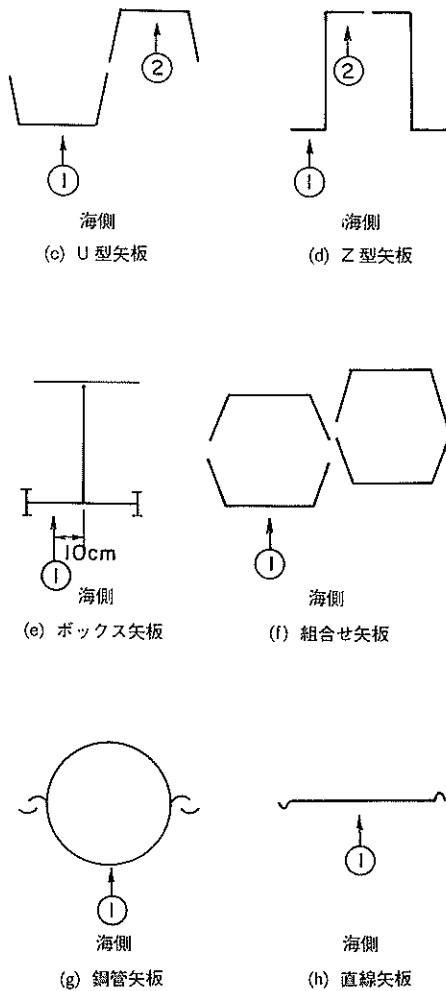
(1) 肉厚測定点は図一 3 を標準とする。図一 3 に示す各肉厚測定点においては、初期肉厚が一樣な約10×10cmの範囲内で数点に厚み計の探触子をあてて肉厚を測定するものとする。(図一 4 参照)

なお、Z型矢板は肉厚一樣なフランジの幅が狭いので、その範囲内で測定するよう注意しなければならない。

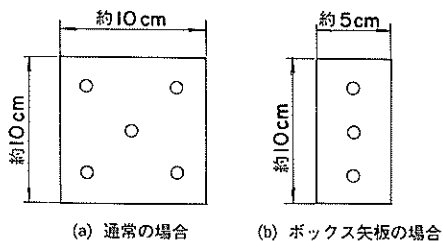
(2) 孔があいている場合は、その点を肉厚測定点の一点に選定し肉厚0とする。



図一 3 肉厚測定点の標準



図一 3 肉厚測定点の標準



図一 4 厚み計の探触子をあてる点

〔解 説〕

(1) 測定箇所における部材の水平断面形状を知るには、水平面で密に肉厚を測るほうがよいが、図一 3 及び図一 4 のように肉厚測定点及び厚み計の探触子をあてる点をとれば応力解析に必要な腐食の状態をほぼ把握できることから、図一 3 を標準とした。腐食の状態や解析方法によっては適宜定めるものとする。

(2) 腐食量は局所的にはばらつきがあるが、それを詳細に表現するよりは、平均値を扱ったほうが実際であるから、ある範囲内での測定値の平均値を求めるため数点に厚み計の探触子をあてて測定することとした。標準的には図一 4 のように 5 点または 3 点（ボックス矢板）とればよい。

ボックス矢板の場合、図一 4 のように 3 点としたのはフランジ部の肉厚が一定でなく、カタログ肉厚が図一 3 の点で与えられているからである。

(3) 鋼管においては、つぎ目の部分は避けるものとする。

2.3.5 測定方法

- (1) 肉厚測定に用いる厚み計は、超音波探傷式厚み計とする。
- (2) 超音波探傷式厚み計は、測定対象鋼材とはほぼ同じ厚さで肉厚既知の基準鋼板に探触子をあてて、正確な肉厚が表示されるように調整しなければならない。
- (3) 肉厚測定点は、ほぼ 10 cm 四方をハンマやスクレーパー等で付着物を除去し、金剛と石やワイヤブラシ等で鋼材面をこすり、鋼材の地はだを露出させる。この際、鋼材面地はだを削り取らぬように注意しなければならない。
- (4) 厚み計の探触子は、定められた探触子をあてる点で、それぞれ 3 回ずつあてて測定するものとする。
- (5) 肉厚測定点の鋼材面の状態の代表例について写真撮影することが望ましい。
- (6) 付着物の除去や、厚み計の探触子を鋼材面にあてる要領などの作業要領を作業員に周知させておかなければならない。

〔解 説〕

(1) 超音波探傷式厚み計とは、鋼材の表面にあてた探触子から鋼材面に放射した超音波パルスが鋼材裏面で反射され、探触子にもどるまでの時間が超音波の通過する距離に比例することを利用して鋼材の厚みを測るもので

ある。水中部と陸上部ではそれぞれ専用の探触子を用いる。通常、探触子を取りかえることにより水中と気中の両方が測定できる厚み計が用いられる。

(2) 超音波探傷式厚み計を用いる場合、事前に肉厚既知の基準鋼板に探触子をあてて、正しい肉厚を指示するよう調整する。水中用探触子を使用するときは、容器にくんだ海水中で探触子を基準鋼板に接触させる。探触子面と基準鋼板面の間に気泡の入らないように、両者をそれぞれ海水中に入れてから海水中で接触させる。陸上用探触子を用いる場合は、グリスをつけて探触子面と基準鋼板面に空気の入らないようにする。なお、基準鋼板の肉厚は、被測定鋼材の推定肉厚付近のものとする。

(3) 付着物を除去する場合は、鋼材地肌を削りとらぬように注意しなければならない。特に、サンダーを用いる場合注意しなければならない。

(4) 探触子をあてたとき異状と思われる測定値が示されたときは再度測定しなければならない。

2.3.6 測定結果の整理

(1) 2.3.5(4)において同一点で3回ずつ測定した値の平均値を各点について算出する。次いで1肉厚測定点におけるそれぞれの平均値の平均をその肉厚測定点の肉厚とする。

(2) 初期肉厚(測定していない場合はカタログ厚)と現在肉厚の差を腐食量とする。

(3) 腐食速度は次式より算出する。

腐食速度 (mm/yr)

$$= \frac{\text{腐食量 (mm)}}{\text{腐食期間 (yr)}}$$

$$= \frac{\text{初期肉厚 (mm)} - \text{現在肉厚 (mm)}}{\text{腐食期間 (yr)}}$$

(4) 将来再び同一点で測定できるように、調査地点の矢板または杭を、たとえば端部より何枚めの矢板のように明確に記録しておかなければならない。

〔解説〕

(1) 探触子をあてる点で3回測定し平均値を求めるのは測定値の正確を期するためである。

(2) 1肉厚測定点において数点の値の平均値を求めるのは、腐食の局所的なばらつきを平均化するためである。応力解析には平均値を用いるが、最小値が非常に小さい場合は、孔のあく危険性を示すため最小値を抽出して記録しなければならない。

(3) 腐食速度より当該構造物の腐食が通常の場合より著しいか否かが量的に把握できる。また、将来時点の鋼

材肉厚を推定するのに用いる。

(4) 無防食期間と電防期間の両方がある場合の腐食速度は次式による。

$$v_c = \frac{c}{y_c + (1-p)y_b}$$

$$v_b = \frac{c - v_c y_c}{y_b}$$

ここに v_c : 無防食状態における腐食速度 (mm/yr)

v_b : 電防状態における腐食速度 (mm/yr)

y_c : 無防食期間 (yr)

y_b : 電防期間 (yr)

c : 腐食量 (mm)

p : 防食率

防食率は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では海水浸水率100%で91%以上とされている。

電防期間がごく短く、無防食期間が長い場合は、電防期間を無視しても ($y_b = 0$) 大差ない。電防を行っている場合は v_b に比べて v_c が非常に大きいから鋼材の現地打設時から電防開始までの放置期間は無視できない。 v_c の値が同一港の施設の調査結果等より推定できるような場合を除いては、防食率を考慮しなければならないが、現時点では細かく定められないので90% ($p = 0.9$) とするのがよい。

電防を行っている場合の腐食速度は、このように不確定な要因が入ることがあるので将来の腐食量の推定に際しては、ここで求められた腐食速度を機械的に用いるのではなく、防食効果の状態、標準的な腐食速度も参考に腐食速度を設定するのがよい。

2.4 電気防食調査

2.4.1 陽極の確認

流電陽極方式により電気防食を行っている施設に対して、潜水夫により陽極の有無を確認する。陽極は全数を対象とする。確認の際、陽極の消耗状態も観察する。代表例について写真撮影が望ましい。

〔解説〕

陽極の調査については、目視による確認と観察をおこなう。

陽極の設計寿命と経過年数を比べて異状に消耗している場合や、構造物の電位が防食電位より不足し、腐食量が大きいのなど問題がある場合には、状況に応じて、陽極の発生電流の測定や重量測定などの詳細な調査を検討す

るのがよい。(詳細の調査については港湾技研資料No. 385, No. 475を参照)

2.4.2 電位測定

- (1) 施設の法線上約50mごとに測定用端子を設置してある地点において構造物の電位を測定する。1施設につき最低2箇所は測定するものとする。さん橋杭は前列杭のみを対象としてよい。
- (2) 構造物の鉛直方向には1m間隔に測定するものとする。
- (3) 矢板の場合には、法線方向に隣接する陽極取付点の中間を測定する。さん橋杭で陽極の取り付けしていない杭がある場合は、その杭を測定する。
- (4) 測定に用いる電極は人工海水塩化銀電極とし、構造物天端から電極を測定深度まで吊下げて測定する。

〔解説〕

電位測定は、構造物が防食電位より卑に保たれているか否かを確認するための調査である。なお防食電位は次のとおりである。

- 770 mV 飽和甘こう電極基準
- 780 mV 人工海水塩化銀電極基準
- 850 mV 飽和硫酸銅電極基準

防食電位に達していない場合は、さらに法線方向に密に測定する。

構造物の電位が防食電位に達していない場合は、電気防食が十分効果を発揮していないので陽極の脱落の有無、肉厚測定の結果等もみて、必要に応じて対策を講じなければならない。

3. 鋼杭式構造物の発生応力

3.1 一般

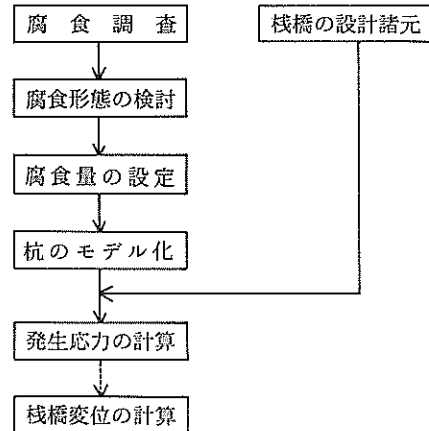
- (1) 本章は、直杭式横棧橋及び、斜め組杭式棧橋の腐食を考慮した杭の発生応力の算定に適用する。本様式以外の鋼杭式構造物についても構造様式の違いを適切に考慮して本章を準用することができる。
- (2) 発生応力は、腐食調査結果に基づき、杭の腐食形態及び腐食量を考慮して算定する。

〔解説〕

(1) 棧橋の発生応力の算定には、現時点での発生応力を算定する場合と将来における発生応力を算定する場合

がある。腐食形態及び腐食量は、いつの時点のものであるかを明確にして設定しなければならない。

(2) 棧橋の杭の発生応力の算定は、一般に次に示す順序で行う。



3.2 腐食形態

腐食形態は、腐食調査結果から適切に設定する。考慮すべき腐食形態は次のものがある。

- (1) 杭の鉛直方向の腐食形態
- (2) 杭断面の腐食形態
- (3) 棧橋法線直角方向における杭の鉛直方向の腐食形態の変化

〔解説〕

(1) 腐食形態には、このほかに棧橋法線方向における杭の鉛直方向の腐食形態の変化があり、法線方向に杭の腐食状態が大きく異なる場合には、これを考慮することが望ましい。

(2) 腐食形態は、腐食状況と解析方法に応じて設定する。杭ごとに腐食状況が異なり、ブロック内のすべての杭の諸元を考慮し、変断面杭として解析する場合はすべての杭の鉛直方向の腐食形態を設定する。法線平行方向の杭の腐食状況の変化が少なく、法線平行方向に杭の諸元を一定とし変断面杭として解析を行う場合は、法線平行方向の杭列ごとに鉛直方向の腐食形態を設定する。鉛直方向の腐食形態の設定には、図-5に示す腐食形態の分類を参考にすることができる。

一様杭として解析を行う場合についても、杭の各部で発生応力の算定を行うために杭の鉛直方向の腐食形態を設定する。

(3) 将来における棧橋の発生応力を算定する際には、

将来の腐食形態を設定する必要がある。将来の腐食形態は海象条件や、周辺環境の変化が大きくなければ、現状の腐食形態と同じとすることができる。

(4) 杭の鉛直方向の腐食形態は、一般に図-5に示すとおりに分類される。すなわち(A)は、平均干潮面直下にきわめて大きな腐食が発生する。(B)は、杭頭部と平均干潮面直下にきわめて大きな腐食が発生する。(C)は、平均干潮面直下に大きな腐食が発生し、深度が下がるにつれて腐食が小さくなる。(D)は、平均干潮面直下に集中腐食が発生しない。また一般に腐食量が小さいため解析の必要がないことが多い。

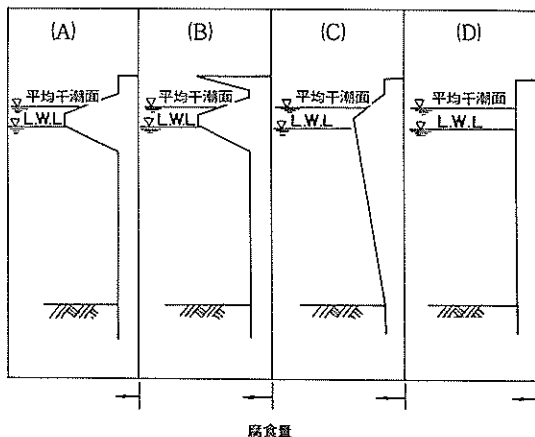


図-5 鋼管杭の鉛直方向腐食形態の分類

(5) 杭断面の円周方向に肉厚測定を行った例を図-6に示す。杭の円周方向に16測定点を取り、各測定点では10cm四方の範囲で5点探触子をあて、この5点の最大値、最小値、平均値が表示されている。この例に示されるように、一般に杭断面の円周方向の腐食傾向は一律ではない。このため4測定点の測定結果から腐食形態を設定することは困難であり、一様腐食と仮定し4点の平均値を残存肉厚として設定する。ただし、4点の変動が大きい場合は誤差が大きくなるので、1点のみが大きな値となる場合は、この値を2番めの値まで下げて4点を平均するのがよい。

図-6に示すとおりにx軸を①~⑧までとり、x軸及びy軸上にそれぞれ2点肉厚を測定したものとし、4点の最大値、最小値、平均値を用いて計算したx軸まわりの断面2次モーメント、及び、16点の肉厚データを用いて計算したx軸まわりの断面2次モーメントを図-7に示す。この例では4点の平均の断面2次モーメントは、16点のデータの断面2次モーメントの-13~+14%の範囲にある。軸番号⑦のように4点の肉厚の変動が大きい場

合は誤差が生じやすいので、1点が大きな値をとる場合は上記の補正をするのが望ましい。

ここで用いたデータは腐食がかなり進行したものであり、腐食がこれほど進行していない鋼杭では、4点の平均の断面2次モーメントと16点の断面2次モーメントの差は小さくなることから、解析には4点の平均を用いることができる。

(6) 栈橋の法線直角方向に杭の腐食形態が変化している場合は、それぞれ杭の腐食形態を設定する。

(7) 栈橋の法線方向に杭の腐食形態が変化しており、法線方向に杭の諸元を変えて応力解析を行う場合は、法線方向それぞれの杭の腐食形態を設定する。

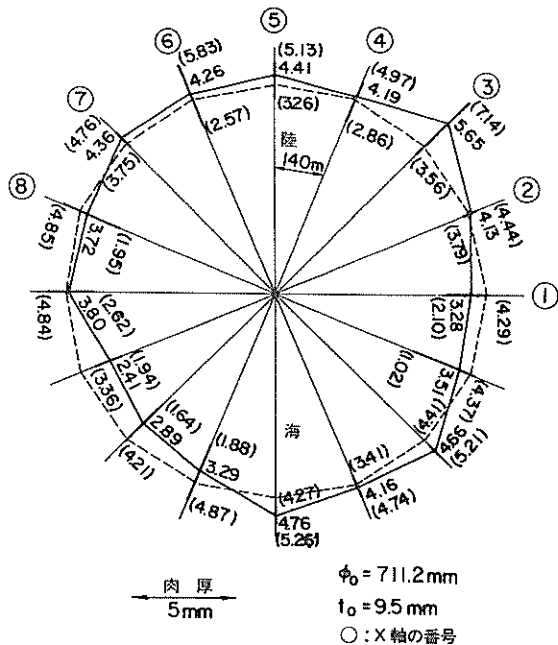


図-6 鋼管断面の肉厚測定例

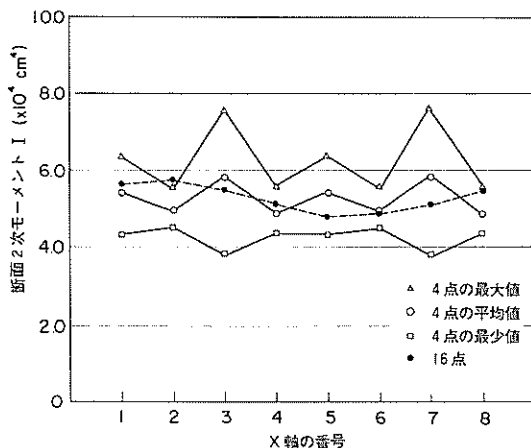


図-7 x軸まわりの断面2次モーメント

3.3 腐食量の設定

腐食量は腐食調査結果から適切に設定する。

〔解説〕

(1) 杭の腐食量は、設定した腐食形態及び解析方法に応じ、腐食調査結果から設定する。

解析において、1ブロック内のすべての杭の諸元を考慮した方法を用いる場合はすべての杭について腐食量を設定する。法線方向に杭の諸元を一定とした解析方法を用いる場合は、法線平行方向の杭列ごとに腐食量を設定する。

杭を変断面杭として解析する場合は杭のモデル化を行うために杭頭部、最大腐食部、最小腐食部の腐食量を設定する。杭を一樣杭として解析する場合についても、杭の各部で発生応力の算定を行うために、杭頭部、最大腐食部、最小腐食部の腐食量を設定する。

(2) 将来の腐食量は、現況の腐食量に今後の腐食量を加えたものとする。今後の腐食量は栈橋の耐用年数と腐食速度より算定する。腐食速度の算定は2.3.6 測定結果の整理による。防食工を施す場合の腐食速度は腐食調

査結果および「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾」(以下、技術基準と呼ぶ)第3編 2.4 防食を考慮して、決定する。

(3) 腐食調査の行われた箇所より深い部分の杭の腐食量及び腐食形態(B)における杭頭部とL.W.L.の間の腐食量が小さい部分の腐食量は、防食が施されていない期間の腐食速度を0.1mm/年として算定した腐食量及び海中部の肉厚測定値を参考に設定する。

(4) 地中部における腐食量は、一般に腐食速度が0.03mm/年程度と小さく無視することができる。

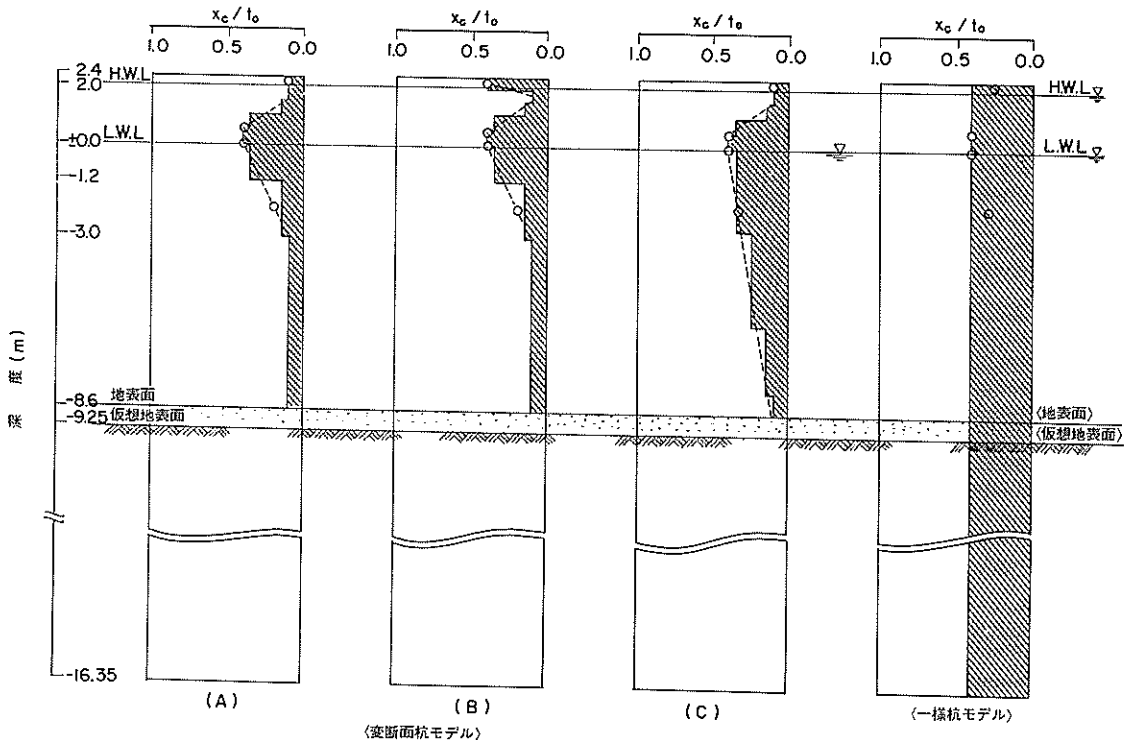
3.4 杭のモデル化

応力計算の対象とする杭は、腐食形態及び腐食量に応じて適切にモデル化を行う。

〔解説〕

(1) 腐食杭のモデル化には、次に示す2つの方法があり、解析方法に応じて選択する。

- ① 腐食杭を一樣厚の杭とする。
- ② 腐食杭を鉛直方向の腐食形態に応じて分割し、それぞれ腐食量に応じて肉厚を設定し、変断面杭とす



- 注) 1. x_c : 腐食厚、 t_0 : 初期肉厚
 2. ○は、肉厚測定箇所を示す。
 3. 斜線部はモデル杭の腐食部を示す。

図一8 杭の鉛直方向腐食形態とモデル化例

る。

(2) 腐食形態(A)、(B)及び(C)のそれぞれについて、腐食調査の結果から、変断面杭としてモデル化を行った例、及び一様杭としてモデル化を行った例を図-8に示す。

この例において、肉厚測定は鉛直方向に4個所で行われている。○印は、肉厚測定箇所と、測定箇所ごとに設定した腐食厚 x_c を初期肉厚 t_0 で無次元化した値を示す。破線は、4個所の測定結果から設定した腐食形態を示す。また、斜線部は、腐食形態に応じて杭を鉛直方向に分割し、それぞれ設定した腐食量を、実線はモデル杭の肉厚を示す。

これらのモデルについて、最大腐食量を同一とし、単杭として水平力を与え応力解析を行った結果を図-9に示す。L.W.L付近の発生応力、もしくは腐食形態(B)と一様杭のくい頭部の発生応力を比較すると、変断面杭と

してモデル化をする場合と一様杭としてモデル化をする場合で発生応力に10%程度の差が生じている。

また、杭の分割が計算精度に及ぼす影響をみるために、腐食形態(A)について図-10に示す5種類の分割を行い、単杭として応力解析を行い、各杭頭モーメントを分割(C-0)の杭頭モーメントで無次元化した値を図-11に示す。この図から、3分割のケース(C-4)でもケース(C-0)に比べ誤差は5%程度であり、分割方法は計算精度に大きな影響を与えないことがわかる。

3.5 直杭式横棧橋の発生応力の計算

直杭式横棧橋の杭に発生する応力は、「技術基準」第8編 保留施設に準じて算定するものとする。

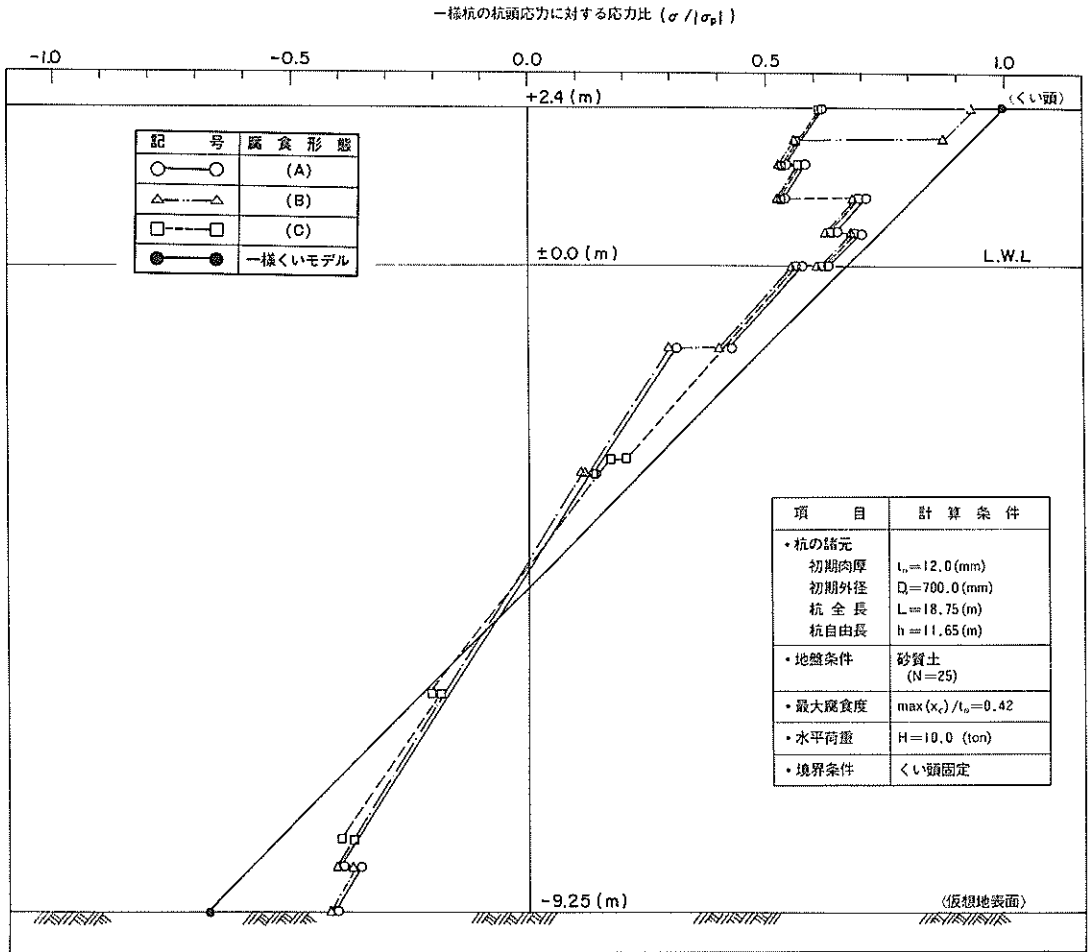
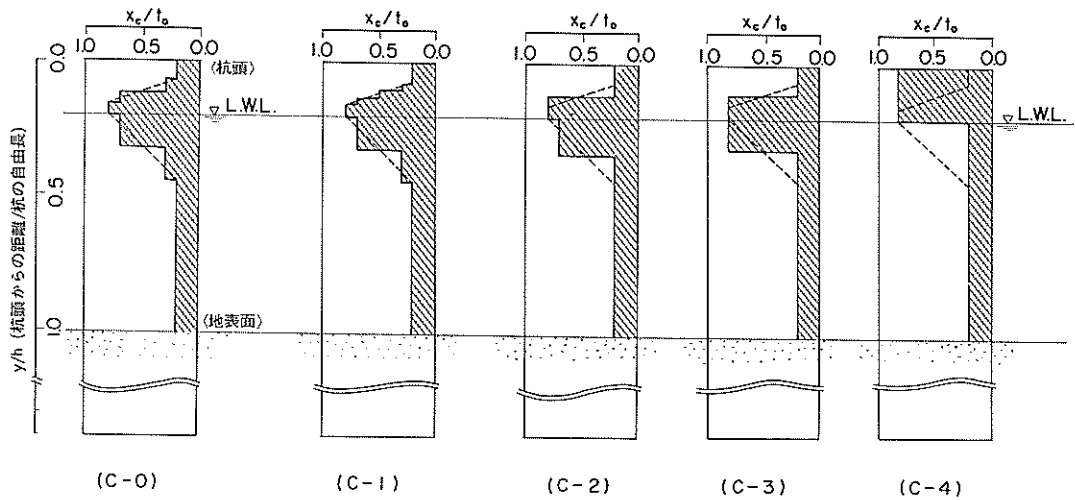


図-9 単杭の腐食形態と曲げ応力鉛直分布

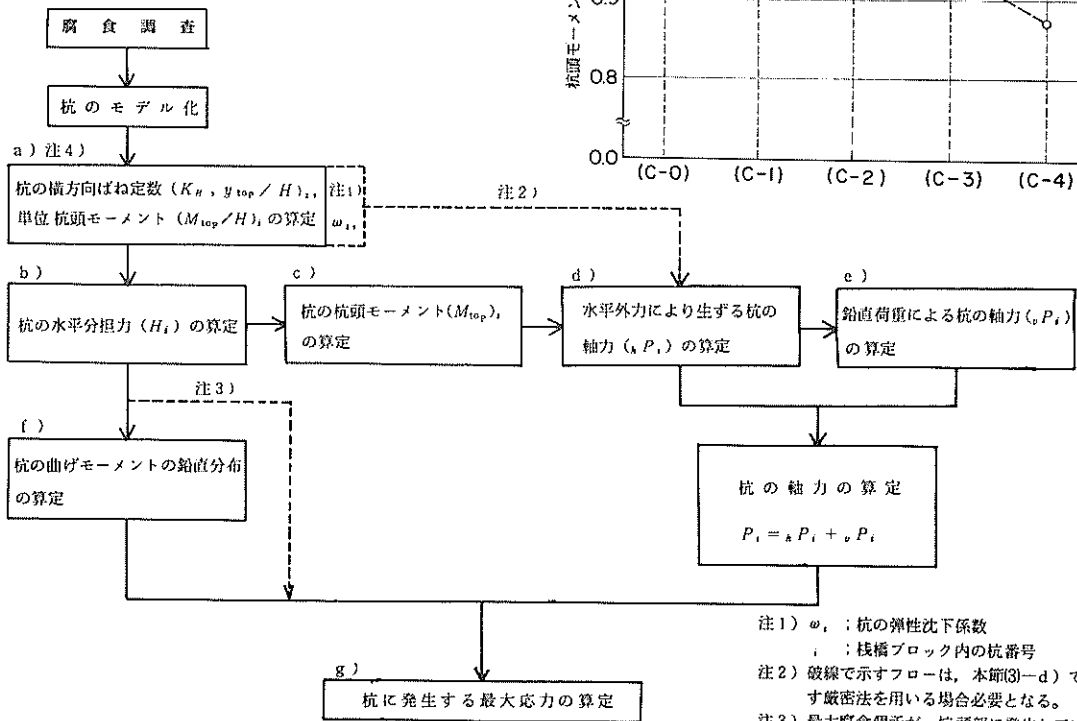
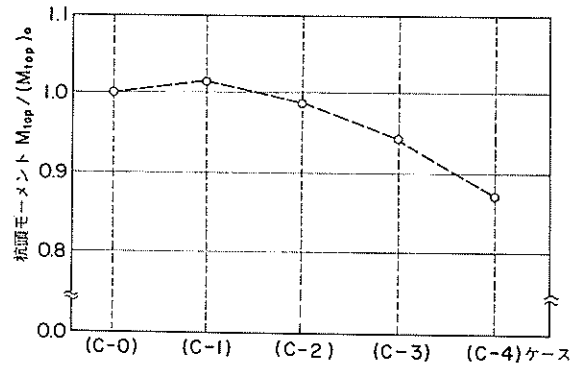


図一 10 腐食杭の分割

- 注) 1. x_c は腐食量, t_0 は初期肉厚, h は杭の自由長,
 y は杭頭からの鉛直距離を示す。
 2. 斜線部は変断面モデル杭の腐食部, 破線は杭
 の腐食パターンを示す。

図一 11 杭の分割と杭頭モーメント

- 注) 1. $(M_{top})_0$ は(C-0)の杭の杭頭モー
 メントを示す。
 注) 2. (C-0)~(C-4)は図-10に
 示すモデル杭を示す。



図一 12 「技術基準」を準用する直杭式横棧橋の腐食杭の計算手順

- 注1) ω_i ; 杭の弾性沈下係数
 i ; 棧橋ブロック内の杭番号
 注2) 破線で示すフローは, 本節(3-d)で示す厳密法を用いる場合必要となる。
 注3) 最大腐食個所が, 杭頭部に発生している場合, 破線のフローを通る。
 注4) 各ボックスの左上に示す a) ~ g) は本節(3)項の「目」番号に対応する。

(1) 一般

直杭式横棧橋の腐食杭に発生する応力の計算法として、技術基準を準用する方法がある。技術基準を準用する方法の、一般的な計算手順を図-12に示す。技術基準を準用する場合、腐食杭の応力計算過程において、腐食杭を一樣杭とした場合と、変断面杭とした場合では「チャンの式」の取り扱いに違いが生じる。また、杭の水平力分担（以下「水平分担力」という）や、水平力による杭に発生する軸力の算定法について、表-1に示すとおり厳密法と簡略法が提案されている。そのため、腐食杭のモデル化の方法、及び厳密法と簡略法の組み合わせにより、表-2に示すように数種の計算が可能となる。

表-1 厳密法と簡略法の概要

算定項目	算定レベル	算定方法
杭の水平力分担の算定（プロックの回転中心の取り方）	簡略法	棧橋のブロックの回転中心を、杭のばね定数等に関係なく一定した点として設定する。
	厳密法	棧橋のブロックの回転中心を、杭のばね定数、杭ねじれ抵抗、杭の配置、および水平力の作用点の影響を考慮し、力のつり合い条件により設定する。
算定（配方法） （杭頭モーメントの発生する杭の軸力の水平荷重により発生する杭の軸力の分）	簡略法	はりの中間支점에作用させる杭頭モーメントを20%割増して、一定の分配率により支点左右のはりへ分配し、支点反力を算定する。
	厳密法	はりの曲げと杭の弾性沈下を考慮した連続ばりの支点上に杭頭モーメントを作用させ、各支点反力を求める。

以上の計算方法のほかに、腐食杭の応力計算を有限要素法により行うことができる。有限要素法は、構造物を要素に細分し変位の連続と力のつながりに基づき数値計算を行う方法であり、複雑な形状の構造にも適用できる。ただし、技術基準に規定する棧橋の設計法の仮定を用いて計算することはできない。有限要素法による方法は電子計算機を用いた大規模な計算となり、データ入力作業も比較的繁雑なものとなる。

本資料では、技術基準を準用する方法について解説する。

表-2 技術基準を準用した直杭式横棧橋の腐食杭の応力計算法

Method No	杭のモデル化	杭の水平分担力 H_i	水平力による杭の軸力 $* P_i$	備考
1	一樣杭	○	○	
2		○	△	
3		△	○	
4		△	△	「技術基準」第8編 8.5.4の方法
5	変断面杭	○	○	
6		○	△	
7		△	○	
8		△	△	

○：厳密法による。
△：簡略法による。

(2) 杭のモデル化と杭の応力計算法の適用条件

腐食杭のモデル化には、一樣杭とする方法と変断面杭とする方法がある。それぞれの場合で、「技術基準」の「チャンの式」の適用条件に差が生じる。

「技術基準」第8編 8.5に示す直杭式横棧橋の発生応力の算定方法は、杭が鉛直方向に同一の断面を有する一樣断面杭であることを前提としたものである。

したがって、変断面杭の横方向ばね定数 (K_H) や、杭頭モーメント (M_{top}) の算定には、「技術基準」第8編 8.5.4に示す式は適用できない。そのため、変断面杭の横方向ばね定数 (K_H) や杭頭モーメント (M_{top}) は、「技術基準」第5編 4.3.4に示すチャンの方法（解4.50）に基づく弾性方程式を変断面杭の条件で解くことにより、 y_{top}/H 及び M_{top}/H (注) を求め、算定しなければならない。（付録1参照）

また、各杭に発生する曲げ応力についても、変断面杭の場合は必ずしも杭頭で最大応力が発生しないため、「技術基準」第5編 4.3.4に示すチャンの方法（解4.50）による弾性方程式を杭頭に水平分担力を作用させ解き、曲げモーメントの鉛直分布を求め、曲げ応力を算定する必要がある。（付録1参照）

注) H ：杭頭へ作用する水平力 (tf)

y_{top} ：杭頭変位 (m)

M_{top} ：杭頭モーメント (tf・m)

(3) 「技術基準」を準用した腐食杭の応力計算の手順
技術基準を準用した腐食杭の応力計算は、図-12に示すとおり、一般に次の手順で行えばよい。

a) 杭の横方向ばね定数 (K_H , y_{top}/H)、単位杭頭

モーメント (M_{top}/H) の算定
 一様杭と変断面杭で、適用する算定式が異なる。

①腐食杭を一様杭とした場合

3.4 杭のモデル化において腐食杭を一様厚の杭とした場合には、「技術基準」第8編 8.5を適用できる。

$$\left. \begin{aligned} (K_H)_i &= \frac{12 EI_i}{(h_i + \frac{1}{\beta_i})^3} \\ (M_{top}/H)_i &= \frac{1}{2} (h_i + \frac{1}{\beta_i}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.1)$$

h_i : 杭頭から仮想地表面までの長さ(m)

$\frac{1}{\beta_i}$: 仮想地表面からの仮想固定点の深さ(m)

EI_i : 杭の曲げこわさ (tf・mf)

H : 杭頭に作用する水平力 (tf)

②腐食杭を変断面杭とした場合

3.4 杭のモデル化において腐食杭を変断面杭とした各杭について、「技術基準」第5編 4.3.4に示すチャンの方法(解4.50)に基づく弾性方程式を、杭頭固定の条件(水平方向の変位は許す)のもとに杭頭部に任意の水平力(H)を作用させ解き、(y_{top}/H)_i及び(M_{top}/H)_iを算定する。(付録1参照)

b) 杭の水平分担力の算定

一様杭と変断面杭のどちらにも、以下の算定法が適用できる。なお、計算法として、簡略法と厳密法がある。

①簡略法

栈橋のブロックの回転を考慮する必要がない場合には「技術基準」第8編 8.5.4の式(8.4)に、a)で求めた杭の横方向ばね定数(K_{Hi} , y_{top}/H)を代入し、各杭へ分配される水平担力を求める。

$$H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum_i K_{Hi}} \bar{H} \dots\dots\dots \text{技術基準 (8.4)}$$

H_i : 杭の水平分担力 (tf)

\bar{H} : ブロックに作用する水平力 (tf)

栈橋ブロックの回転を考慮する必要がある場合には、「技術基準」第8編の式(8.5)を用いればよい。

$$H_i = \frac{K_{Hi}}{\sum_i K_{Hi}} \bar{H} + \frac{K_{Hi} X_i}{\sum_i K_{Hi} X_i^2} e \bar{H} \dots\dots\dots \text{技術基準 (8.5)}$$

e : 栈橋のブロックの対称軸と水平力の作用線との距離 (m)

X_i : 栈橋のブロックの対称軸から各くいまでの距離 (m)

②厳密法(栈橋のブロックの回転を考慮する必要がある場合)

「技術基準」第8編の式(8.5)は、次に示す方法²⁾を簡略化したものである。よってより厳密な応力計算を行う必要がある場合には、次の方法を用いるのが望ましい。

①栈橋ブロックの回転角を式(3.2)より求める。ただし式(3.2)では、杭のねじれ応力は無視している。

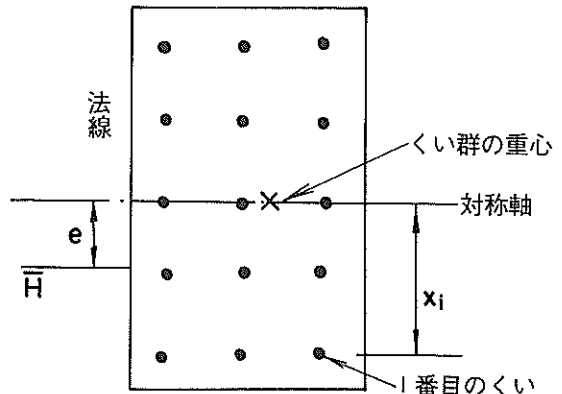


図-13 杭の位置および作用する水平力

$$\alpha = \frac{\bar{H}_x \sum_i K_{Hi} (Y - y_i) + \bar{H}_y \sum_i K_{Hi} (x_i - X)}{\sum_i K_{Hi} (\sum_i K_{Hi} x_i^2 + \sum_i K_{Hi} y_i^2) - (\sum_i K_{Hi} x_i)^2 - (\sum_i K_{Hi} y_i)^2} \dots\dots (3.2)$$

\bar{H}_x, \bar{H}_y : 栈橋に作用する x 軸方向(法線直角方向)、 y 軸方向(法線平行方向)の水平荷重 (tf)

X, Y : 荷重の作用点の座標 (m)

x_i, y_i : 各杭の座標 (m)

K_{Hi} : 各杭の横方向ばね定数 (t/m)

①式(3.2)より求めた、 α を式(3.3)に代入し、ブロックの回転中心(X_0, Y_0)を求める。

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= \frac{\alpha \sum_i K_{Hi} x_i + \bar{H}_y}{\alpha \sum_i K_{Hi}} \\ Y_0 &= \frac{\alpha \sum_i K_{Hi} y_i - \bar{H}_x}{\alpha \sum_i K_{Hi}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

② α, X_0, Y_0 を用いて、式(3.4)より、各杭の水平分担力 H_{xi}, H_{yi}, H_i を求める。

$$\left. \begin{aligned} H_{xi} &= \alpha K_H (y_i - Y_0) \\ H_{yi} &= -\alpha K_H (x_i - X_0) \\ H_i &= \sqrt{(H_{xi})^2 + (H_{yi})^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.4)$$

なお、以上に示す方法では、隣接ブロックの影響を考慮していない。よって、この方法による算定結果を用いる際には、栈橋の法線方向への、ブロックの変位量が、実際の栈橋において妥当なものか否かを、検討しなければならない。

c) 杭頭モーメントの算定

一様杭と変断面杭のどちらにも、以下の算定法が適用できる。

a), b) で求めた、単位杭頭モーメント $(M_{top}/H)_i$ 、水平分担力 (H_i) を、式 (3.5) に代入し杭頭モーメントを求める。

$$\left. \begin{aligned} (M_{top})_i &= (M_{top}/H)_i \cdot H_i \\ (M_{top})_{zi} &= (M_{top}/H)_i \cdot H_{zi} \\ (M_{top})_{yi} &= (M_{top}/H)_i \cdot H_{yi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

d) 水平外力により各杭に発生する軸力 $({}_h P_i)$ の算定

一様杭と変断面杭のどちらにも、以下の計算法が適用できる。計算法として、簡略法と厳密法がある。

①簡略法

水平力による各杭の軸力 $({}_h P_i)$ を「技術基準」第8編 8.5.4の方法により求める。

$${}_h P_i = S_{i,i-1} + S_{i,i+1} - \frac{M_{i-1,i} + M_{i,i-1} - M_{i,i+1} - M_{i+1,i}}{l}$$

$S_{i,i-1}$: i 番めの杭頭における $(i-1)$ 番めの杭側のはりの水平力によるせん断力 (tf)

$S_{i,i+1}$: i 番めの杭頭における $(i+1)$ 番めの杭側のはりの水平力によるせん断力 (tf)

$M_{i-1,i}$: $(i-1)$ 番めにおける (i) 番めの杭側のはりの水平力による曲げモーメント (tf・m)

$M_{i,i-1}$: i 番めの杭頭における $(i-1)$ 番め

の杭側のはりの水平力による曲げモーメント (tf・m)

$M_{i,i+1}$: i 番めの杭頭における $(i+1)$ 番めの杭側のはりの水平力による曲げモーメント (tf・m)

$M_{i+1,i}$: $(i+m)$ 番めの杭頭における (i) 番めの杭側のはりの水平力による曲げモーメント (tf・m)

l : はりのスパン (m)、杭の間隔とする。

なお、ここで $M_{i,i-1}$ 、 $M_{i,i+1}$ は杭頭モーメントを M_i とすると中間の支点上では、技術基準式 (8.11) で求め、端の支点上では杭頭モーメント M_i そのままとればよい。(図-14 参照)

$$\left. \begin{aligned} M_{i,i-1} &= a M_i \\ M_{i,i+1} &= b M_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{技術基準 (8.11)}$$

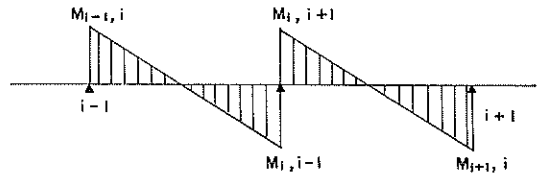


図-14 杭頭モーメントの分布

ここに

a, b : 2スパンの場合は、 $a = 0.60, b = 0.60$ 、3スパンの場合は、2番めの杭頭では $a = 0.50, b = 0.70$ 、3番めの杭頭では $a = 0.70, b = 0.50$ とする。

なお法線方向の杭頭モーメント成分 $(M_{top})_y$ が大きく無視できない場合には、法線方向のはりと、法線直角方向のはりそれぞれについて、 $(M_{top})_z$ 、 $(M_{top})_y$ を用いて上記方法により水平力による軸力を求め、その和を各杭に作用する水平力による軸力とする。

②厳密法

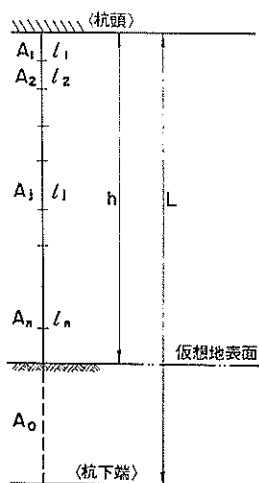
「技術基準」第8編 4.3.4に示す水平力による杭の軸力の算定方法は、簡略化法である。そのため、より厳密な応力計算を行う必要がある場合には、杭頭を支点とする弾性支承上の連続ばりの支点上に、c) で求めた杭頭モーメント $(M_{top})_i$ が作用するときの支点反力を求め、これを水平力による軸力とするのが望ましい。³⁾

なお連続ばりの支点の弾性沈下係数は、式(3.6)により求めることができる。⁴⁾

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{A_j} + \eta \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{L-h}{EA_0} & (\text{純粋な支持杭の場合}) \\ \frac{2(L-h)}{3EA_0} & (\text{砂質土中の純粋な摩擦杭の場合}) \\ \frac{L-h}{2EA_0} & (\text{粘性土中の純粋な摩擦杭の場合}) \end{cases}$$

L : 杭の全長 (m)
 h : 杭頭から仮想地表面までの深さ (m)
 l_j : 仮想地表面上のモデル杭の長さ (m)



図一15 変断面杭の諸元

A_j : 仮想地表面上のモデル杭の純断面積 (m²)
 A_0 : 仮想地表面下の杭の純断面積 (m²)
 E : 杭の弾性係数 (tf/m²)

e) 鉛直荷重による各杭の軸力 (P_i) の算定
 一様杭と変断面杭のどちらにも、次の方法が適用できる。

鉛直荷重による各杭の軸力 (P_i) は、杭位置で支持された単純ばりとして算出した支点反力とする。

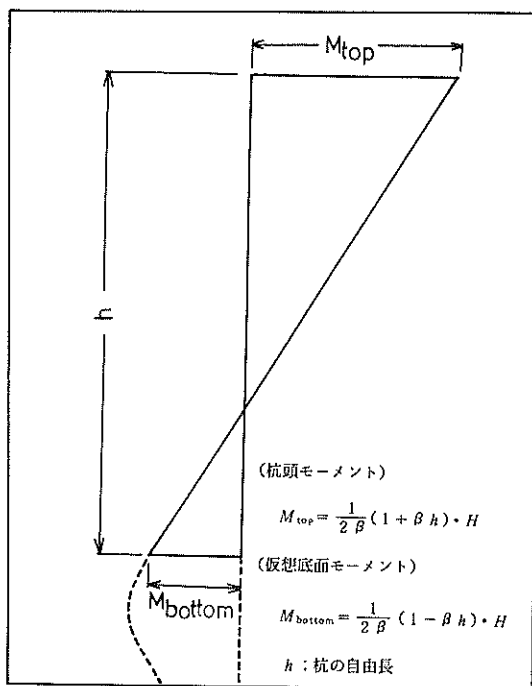
f) 杭に発生する曲げモーメントの鉛直分布の算定
 一様杭と変断面杭で、適用する算定法が異なる。

3.4でモデル化を行った栈橋の各杭それぞれに、b)で求めた水平分担力 (H_i) を、杭頭に作用させ、杭に発生する曲げモーメントの鉛直分布を求める。

①腐食杭を一様杭とした場合

腐食杭の最大応力は、通常の栈橋の場合海底面より上の部分で発生するため、必要となる曲げモーメント分布は、仮想海底面より上の部分だけでよい。仮想海底面から杭頭部までの杭の曲げモーメント分布は、(3.7)式に、b)で求めた、水平分担力 (H_i) を代入し、杭頭モーメントと、仮想海底面での杭の曲げモーメントを求め、直線で結べばよい。

$$\left. \begin{aligned} (M_{top})_i &= \frac{1}{2\beta} (1 + \beta h_i) \cdot H_i \\ &= (M_{top}/H)_i \cdot H_i \\ (M_{bottom}) &= \frac{1}{2\beta} (1 - \beta h_i) \cdot H_i \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.7)$$



図一16 一様杭モデルの曲げモーメント分布

②腐食杭を変断面杭とした場合

3.4杭のモデル化において、腐食杭を変断面杭とした場合、各杭に対して、以下の方法で算定する。「技術基準」第5編4.3.4解析的手法による推定チャンの方法(解4.50)による弾性方程式を、杭頭固定の条件のもとで、杭頭に、b)で求めた水平分担力 (H_i) を作用させ、解き、杭に発生する曲げモーメントの鉛直分布を求める。(付録1参照)
 g) 杭に発生する最大応力の算定

一様杭と変断面杭で、適用する算定法が異なる。
 栈橋の各杭に発生する応力の鉛直分布を「技術基準」
 第8編 8.5.5式(8.12)に従って算定し、杭に発生す
 る最大応力の値、及びその位置を求める。

①腐食杭を一様杭とした場合

最大腐食個所が杭頭に現れている場合には、c)で求めた杭頭モーメント $(M_{top})_i$ 、杭に作用する軸力 (P) 、と杭頭部の断面諸元(断面係数 $(Z_{top})_i$ 、断面積 $(A_{top})_i$)を用いて、式(3.8)より、杭に発生する最大応力を求めることができる。

$$(\sigma_{max})_i = \left| \frac{P_i}{(A_{top})_i} \pm \frac{(M_{top})_i}{(Z_{top})_i} \right| \dots\dots\dots (3.8)$$

この場合、f)の杭の曲げモーメントの鉛直分布を算定する必要はない。

最大腐食個所が杭頭より下に表れている場合には、杭の肉厚測定結果、及び鉛直方向の腐食形態を考慮し適切設定した断面諸元(断面係数、断面積)の値(鉛直方向に変化する)と、一様断面杭モデルにより算定した杭の曲げモーメント、及び軸力の値を用いて、式(3.9)より、杭に発生する最大応力を求めなければならない。

一般に、杭頭か、最大腐食個所のどちらかで、最大応力が発生することが多い。

$$(\sigma_{max})_i = M_{ax} \left[\left| \frac{P_i}{A(y)_i} \pm \frac{M(y)_i}{Z(y)_i} \right| \right] \dots\dots\dots (3.9)$$

- y ; 杭頭から鉛直方向距離 (m)
- $Z(y)_i$; y における杭の断面係数 (cm³)
- $A(y)_i$; y における杭の断面積 (cm²)

$M(y)_i$; y における一様断面杭モデルで求めた杭の曲げモーメント (kg・m)

P_i ; 一様杭モデルで求めた杭に作用する軸力 (kg)

②腐食杭の変断面杭とした場合

変断面杭の場合の杭の最大応力は、(3.10)式により求めればよい。

$$(\sigma_{max})_i = M_{ax} \left[\left| \frac{P}{A_j} \pm \frac{M_j}{Z_j} \right| \right] \dots\dots\dots (3.10)$$

- j ; モデル化した杭の区分番号
- M_j ; 杭の j 番めの区分での曲げモーメントの絶対値の最大値 (kg・cm)
- P ; 杭に作用する軸力 (kg)
- A_j, Z_j ; 杭の区分 j での断面積 (cm²)と断面係数 (cm³)

3.4に従って、モデル化した変断面杭の1つの区間 j ($y_j \leq y < y_{j+1}$)では、断面諸元 (Z_j, A_j) は一定となるが、曲げモーメント $M(y)$ は変化する。

よって、ある区間 j の曲げモーメント $M(y)$ ($y_j \leq y < y_{j+1}$)の絶対値が最大となるものを M_j とすると、 $\left| \frac{P}{A_j} \pm \frac{M_j}{Z_j} \right|$ が一般にその区間 j の最大応力を示すことになる。

以上の方法により直杭式横栈橋の腐食杭に発生する最大応力を算定することができる。

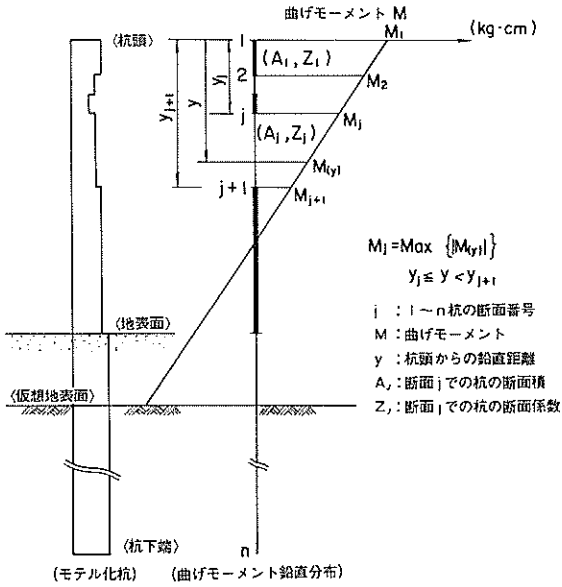
(4) 各算定方法による腐食栈橋の比較計算例

(1)~(3)で示した腐食杭に発生する応力の算定法を用いて、実際の栈橋で行った比較計算例を示す。

表一 3 比較計算の方法

Method No	腐食杭のモデル化	計算の基本的考慮	水平分担力の算定法	水平力による軸力の算定法
Method 1.	一様断面杭	「技術基準」を準用する。	厳密な方法 (港湾技研資料No.59)	厳密な方法 (港湾技研資料No.59)
Method 5.	変断面杭		厳密な方法 (港湾技研資料No.59)	厳密な方法 (港湾技研資料No.59)
Method 6.			厳密な方法 注1) (港湾技研資料No.59)	簡略化法 (「技術基準」第8編)
Method 8.			簡略化法 (「技術基準」第8編)	簡略化法 (「技術基準」第8編)
Method 9.			有限要素法による。	

注1) 杭のねじれ応力を無視した。



図一 17 変断面杭の 1 区分内の最大曲げモーメント

①比較計算の方法

比較計算の方法を表一 3 に示す。

比較計算法として、表一 2 の Method 1, Method 5, Method 6, Method 8 と、有限要素法を選定した。なお Method 7 は計算の煩雑さに比べ計算結果の誤差が大きく実用性が少ないため比較対象から除いている。比較検討計算法の選定は以下の観点から行われている。

⑦ 計算方法の違いによる腐食杭の応力計算結果の差はどの程度となるか。(表一 3 の Method 5, Method 6, 及び Method 8, 並びに有限要素法 (F. E. M.) の比較。

④ 杭のモデル化の違いによる腐食杭の応力計算結果の差はどの程度となるか。(表一 3 の Method 1, Method 5 の比較)

②計算条件

計算条件は以下のとおりである。

⑦計算対象栈橋

比較計算の対象とした栈橋の諸元を図一 18, 図一 19 に示す。

①荷重条件

- ・上載荷重 ; $q = 1.5 \text{ t/m}^2$ (栈橋に一樣に分布)
- ・水平荷重 ; $H = 55.0 \text{ t}$

偏心なしの場合 ; 図一 19 の矢印 A

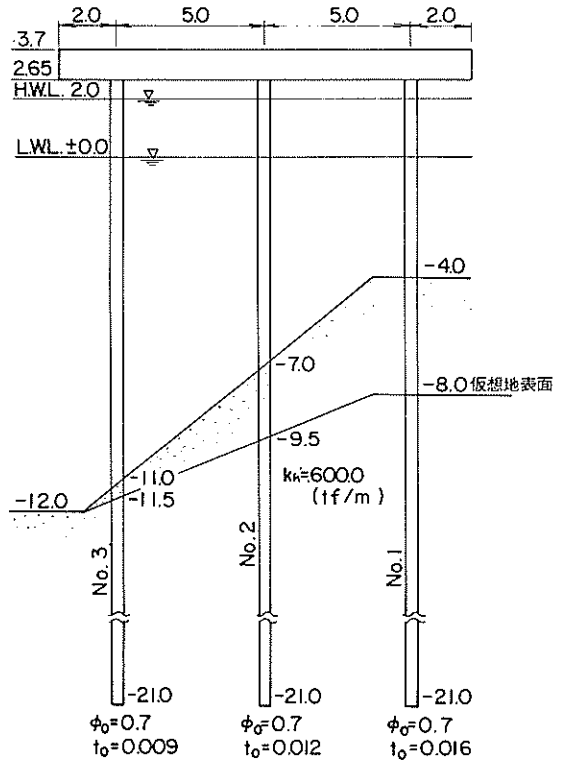
偏心ありの場合 ; 図一 19 の矢印 B

②杭の腐食量と鉛直方向腐食形態

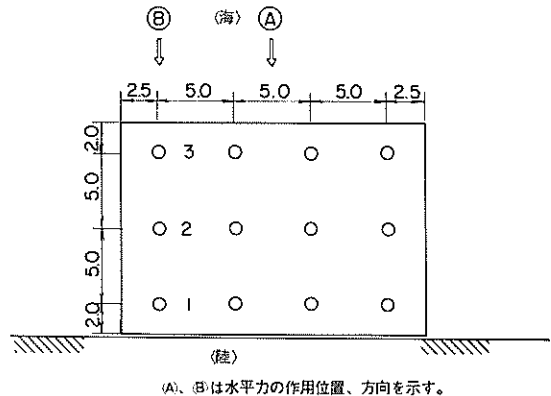
- ・杭の腐食量 各杭の腐食量は表一 4 に示すとおりである。

りである。

・杭の鉛直方向腐食形態 杭の鉛直方向の腐食形態に基づき、3.4 の方法により変断面杭として、腐食杭をモデル化した結果を図一 20 に示す。なお栈橋の法線方向には、杭の腐食量、腐食形態とも変化しないと仮定している。有限要素法に用いる杭も、これと同一の変断面杭としている。

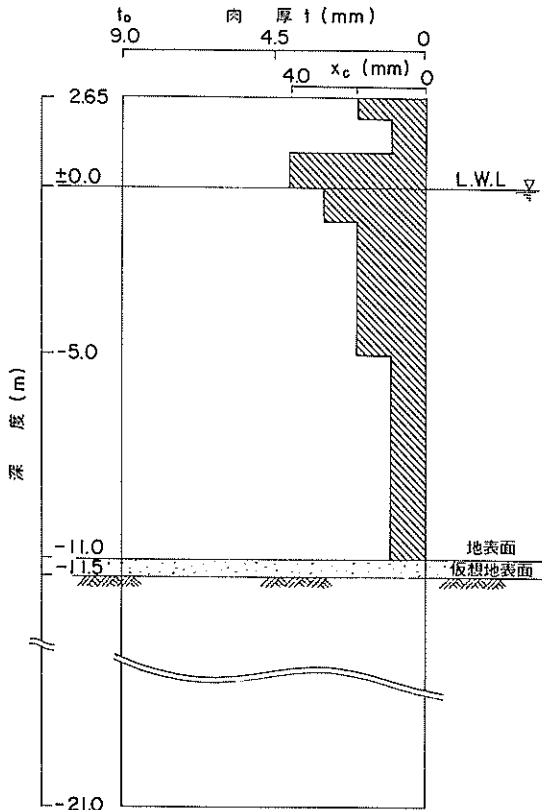


図一 18 計算対象栈橋の横断面諸元 (m)



(A), (B) は水平力の作用位置、方向を示す。

図一 19 計算対象栈橋の平面諸元 (m)



注) 1. 腐食量および腐食形態は PILE 1, PILE 2 も同じ。
 2. 初期肉厚, 地表面および仮想地表面については, PILE 1, PILE 2 は異なる値。

図-20 PILE 3 のモデル化

表-4 杭の腐食量

PILE No.	初期肉厚 t_0 (mm)	最大腐食量 $x_{c \max}$ (mm)	$x_{c \max} / t_0$
1	16.0	4.0	0.25
2	12.0	4.0	0.33
3	9.0	4.0	0.44

③比較計算結果

各計算方法による各杭に生じる最大応力を表-5 に示す。また, No.1 の杭に発生する応力の鉛直方向分布を図-21, 図-22 に示す。

比較計算の主な結果は以下のとおりである。

⑦水平荷重が偏心していない場合

・Method 1 (一様杭の方法) では, 他の方法 (「技術基準を準用した変断面杭の方法) に比べ, 杭に発生する最大応力の値が, 0~7%程

度大きな値となっている。また, Method 9 (E. E. M) では, 逆に 5~11%程度小さな値となっている。

・Method 5, Method 6, Method 8 の計算結果は, 同じ値となり差が見られない。(表-5 に示す値は, 第1位を四捨五入したものである。)

⑧水平荷重が偏心する場合

・各計算方法により最大応力の値に大きな差がみられ, Method 8, Method 6, Method 1, Method 5, Method 9 の順に最大応力が小さくなっている。

・Method 5 に比べると, 杭に発生する最大応力の値は,

Method 1 は 0~7%程度大きな値

Method 6 は 7~16%程度大きな値

Method 8 は 20~38%程度大きな値

Method 9 は 0~8%程度小さな値

となっている。Method 8 によると, 杭に発生する応力が他に比べかなり大きな値となっており, 過大な設計となる恐れがある。

・同じブロックの杭でも, 海側と陸側の杭で, 各計算方法による最大応力の値の差の程度に違いが見られ, 陸側の杭 (PILE 1) のほうが海側の杭 (PILE 3) より計算方法の差による最大応力の値の差が大きくなっている。

3.6 斜め組杭式横棧橋の発生応力の計算

斜め組杭式横棧橋の杭の部材力と応力は, 「技術基準」第8編第9章9.1 斜め組杭式横棧橋の方法により算定する。

〔解説〕

(1) 「技術基準」第8編第9章9.1.5(1) 各組杭頭に分担される水平力の式(9.1), (9.2)中の C_i を求める式は, 一様断面杭の杭頭軸方向ばね係数を用いた場合の式であり, 一般的には式(3.11)で表現される。

$$C_i = \frac{\sin^2(\theta_{i1} + \theta_{i2})}{(1/\omega_{i1}) \cos \theta_{i2} + (1/\omega_{i2}) \cos \theta_{i1}} \dots \dots \dots (3.11)$$

ここに

ω_{i1}, ω_{i2} : 各杭の杭頭軸力方向ばね係数 (T/M)

θ_{i1}, θ_{i2} : 各杭の鉛直方向となす角度 (度)

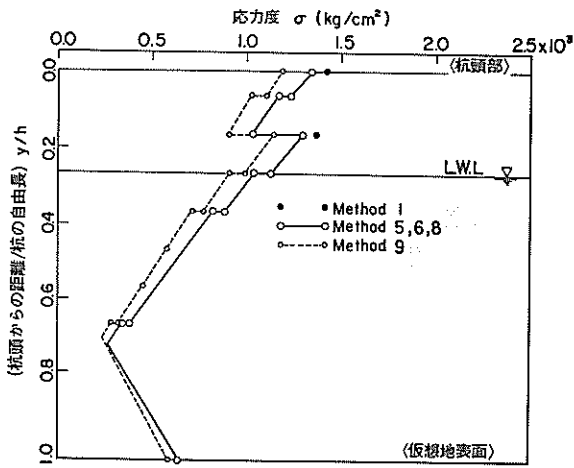
したがって, 腐食を考慮してモデル化した杭を用いて各組杭頭に分担される水平力を計算する場合, モデル化

表一 5 各計算方法による腐食杭に発生する最大応力の算定結果

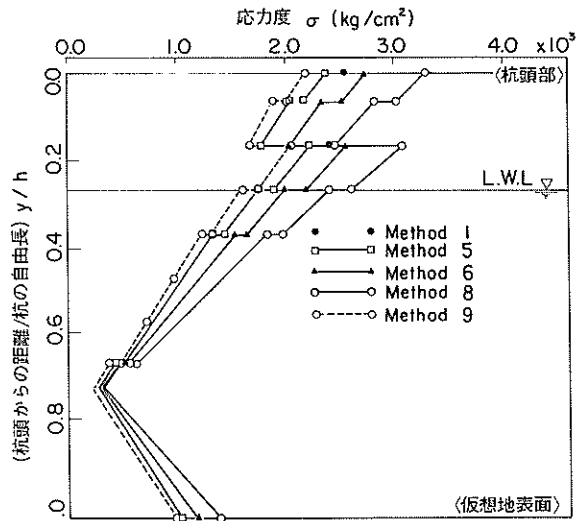
Method No.	水平荷重条件 (偏心の有無)	最大応力 注1) (kg/cm ²)		
		PILE 1	PILE 2	PILE 3
Method 1	無	1430 (1.07)	1370 (1.02)	1400 (0.94)
	有	2550 (1.07)	2210 (1.01)	2340 (0.98)
Method 5	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	2380 (1.00)	2180 (1.00)	2400 (1.00)
Method 6	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	2730 (1.15)	2420 (1.11)	2730 (1.14)
Method 8	無	1340 (1.00)	1340 (1.00)	1490 (1.00)
	有	3290 (1.38)	2870 (1.32)	2870 (1.20)
Method 9	無	1190 (0.89)	1270 (0.95)	1410 (0.95)
	有	2200 (0.92)	2180 (1.00)	2400 (1.00)

注1) 最大応力の値は、第1位の値を4捨5入したものである。

注2) () 内の数値は、各計算方法による最大応力の Method 5 による最大応力に対する比を示す。



図一 21 P I L E . 1 の鉛直応力分布
(水平荷重: 偏心なし)



図一 22 P I L E . 1 の鉛直応力分布
(水平荷重: 偏心あり)

した杭の弾性沈下係数 ω を用いて式(1)により C_i を求める必要がある。

弾性沈下係数 ω は式(3.6)により求めることができる。

4. 鋼矢板式構造物の発生応力

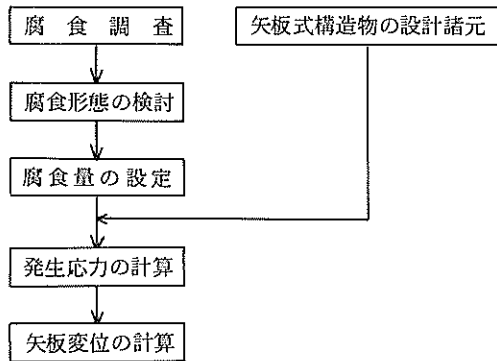
4.1 一般

- (1) 本章は、鋼矢板式係船岸の腐食を考慮した矢板の発生応力の算定に適用する。本様式以外の鋼矢板式構造物についても、構造様式の違いを適切に考慮して、本章を準用することができる。
- (2) 発生応力は、腐食調査結果に基づき、矢板の腐食形態及び腐食量を考慮して算定する。

〔解説〕

(1) 矢板の発生応力の算定には、現時点での発生応力を算定する場合と将来における発生応力を算定する場合がある。腐食形態及び腐食量は、いつの時点のものであるかを明確にして設定しなければならない。

(2) 矢板の発生応力の算定は一般に次の順序で行う。



(3) 鋼矢板セルの矢板断面は、一般に海底面における矢板の張力によって決定される。矢板本体部の応力度は肉厚測定結果から矢板の肉厚を設定して算定することができるが、腐食した爪の引張強度の設定は困難である。

しかし、一般に海底面付近の矢板の腐食量は小さく、また、腐食速度の大きい海水面付近は応力が小さく断面に余裕があり問題とならないことが多い。鋼矢板セルの場合は、孔の発生が問題となる。

4.2 腐食形態

腐食形態は、腐食調査結果から適切に設定する。考慮すべき腐食形態は次のものがある。

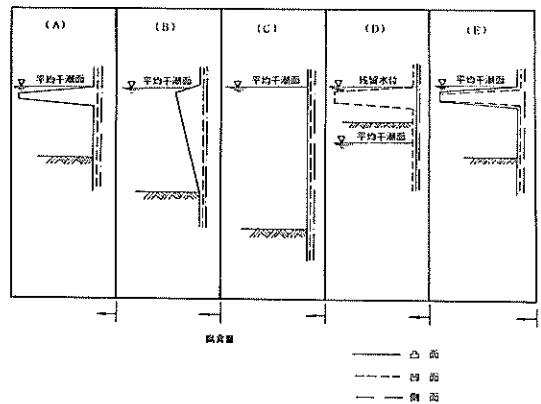
- (1) 矢板の鉛直方向の腐食形態
- (2) 矢板の断面の腐食形態
- (3) 構造物の法線方向における矢板の鉛直方向の腐食形態の変化

〔解説〕

(1) 矢板の断面応力は、矢板各部の曲げモーメントと断面係数から算定するため、解析の対象とする矢板の鉛直方向の腐食形態を設定する必要がある。

腐食調査結果から鉛直方向の腐食形態を設定する際には、腐食形態の分類を参考とすることができる。

(2) 鋼矢板の鉛直方向の腐食形態は、一般に図—23に示すとおり分類される。すなわち、(A)は平均干潮面直下の凸面にきわめて大きな腐食が発生する。(B)は平均干潮面直下の凸面に大きな腐食が発生し、深度が下がるにつれて、腐食が小さくなる。(C)は平均干潮面直下に集中腐食が発生しない。また一般に、腐食量が小さく、解析の必要がないことが多い。(D)は残留水位直下の凹面のみに腐食が集中するもので、事例としてはきわめて少ない。(E)は平均干潮面直下の凸面と凹面にきわめて大きな腐食が発生するもので、事例は少ない。



図—23 鋼矢板の鉛直方向腐食形態の分類

(3) 矢板の断面内の腐食形態は、断面係数等を算定するために設定する必要がある。腐食調査において、Z型矢板及びU型矢板では凸面と凹面の肉厚測定をすることを標準としており、凸面及び凹面にそれぞれ一様の腐食があるものとする。矢板断面内の腐食は、一般に凸面が大き

く、凹面及び側面が小さい。

U型矢板とZ型矢板以外の矢板では1断面内で1点の肉厚測定を標準としており、一様腐食とする。

(4) 構造物の法線方向に矢板の鉛直方向の腐食形態または腐食量が異なる場合は、それぞれの腐食状況に応じて、腐食形態等を設定し応力計算を行う。

4.3 腐食量の設定

鋼矢板の発生応力の算定に用いる腐食量の設定は3.3 腐食量の設定 に準ずる。

4.4 発生応力の計算

- (1) 鋼矢板式係船岸の矢板に作用する曲げモーメントの計算は、「技術基準」第8編 係留施設に準じて行う。
- (2) 矢板の発生応力の計算には、矢板の腐食形態及び腐食量を考慮した断面係数を用いる。

〔解説〕

(1) 矢板の曲げモーメントの計算において、仮想はり法を用いる場合には、腐食による矢板断面の変化は、曲げモーメントの計算に影響しないため、曲げモーメントの

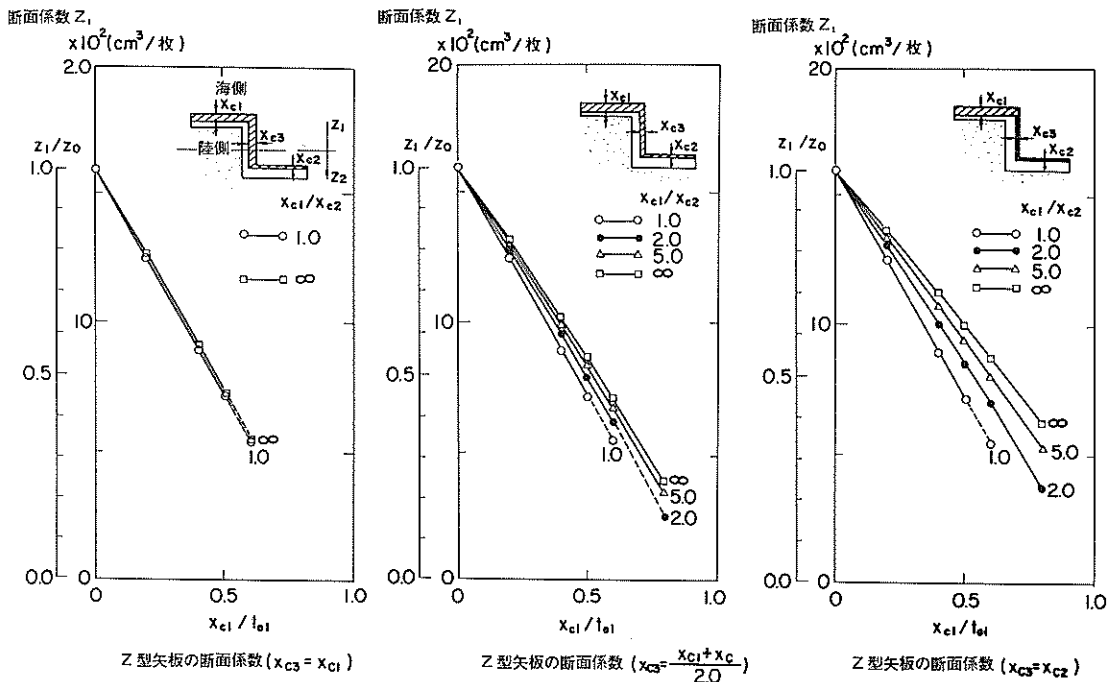
計算は、「技術基準」第8編 5.3.3 矢板の曲げモーメントによる。

(2) 軟弱地盤における矢板式係船岸において、たわみ曲線法によって曲げモーメントを計算する場合は、「技術基準」第8編 5.8 軟弱地盤における係船岸の設計に準じ、以下の手順で行うことができる。

- ① 矢板を鉛直方向の腐食形態に応じて分割し、各部において、腐食量を考慮して、断面2次モーメント I を求める。
- ② 「技術基準」に従い、根入長を仮定して矢板の曲げモーメントを計算する。
- ③ 矢板各部の断面2次モーメント I を用いた弾性荷重 M/EI によって矢板の変位を計算する。
- ④ タイロッド取付点の変位がゼロとまらない場合は、根入長を仮定しなおしてタイロッド取付点の変位がゼロとなるまで同様の作業を繰り返す。

(3) 軟弱地盤における矢板式係船岸において、有限要素法を用いて矢板の曲げモーメントを計算することができる。ただし、「技術基準」に規定する矢板の設計法の仮定を用いて計算することはできない。

(4) 矢板の断面2次モーメント及び断面係数は、矢板断面の腐食形態を考慮して算定する。断面2次モーメント及び断面係数は凸面、凹面及び側面腐食量によって変



図一 24 Z型矢板 (YSP Z45) 相当の断面係数

化する。Z型矢板の断面を簡略化して、凸面の腐食量 x_{c1} 、及び凸面と凹面の腐食量の比 x_{c1}/x_{c2} をパラメーターとし、側面の腐食量 x_{c3} を、 $x_{c3}=x_{c1}$ 、 $x_{c3}=(x_{c1}+x_{c2})/2$ 及び $x_{c3}=x_{c2}$ と仮定して計算した断面係数を図一24示す。この図によると、側面の腐食厚 x_{c3} によって断面係数は変化する。しかし、側面にはテーパがついており、腐食調査の結果から腐食量を設定しにくいこと、及び一般に側面の腐食量は凸面に比べて小さいことなどから、断面2次モーメント及び断面係数は、側面の腐食量を凸面と凹面の腐食量の平均として算定してよい。断面2次モーメント及び断面係数の算定図を付録に示す。

5. 健全度の評価

5.1 鋼杭式構造物の健全度の評価

鋼杭式構造物の健全度は、次の事項により評価する。

- (1) 設計外力作用時に杭の応力度が許容応力度を満足するものを健全とする。
- (2) 許容応力度は、「技術基準」第3編 2.3.3 鋼杭材及び 2.3.8 許容応力度の割増しによる。

〔解説〕

(1) 栈橋の設計外力は、「技術基準」第8編 8.3.1 設計外力による。

(2) 健全度を評価する際には、解析の目的に応じ、それが現時点のものであるのか、それとも将来のいつの時点のものであるかを明確にしておかなければならない。

(3) 栈橋の変位が制限される場合は、栈橋変位の検討を行わなければならない。

5.2 矢板式構造物の健全度の評価

矢板式構造物の健全度は次の事項により評価する。

- (1) 設計外力作用時に矢板の応力度が許容応力度を満足するものを健全とする。
- (2) 許容応力度は、「技術基準」第3編 2.3.4 鋼矢板材及び 2.3.8 許容応力度の割増しによる。

〔解説〕

(1) 矢板式構造物の設計外力は、「技術基準」第8編 5.2.1 考慮すべき外力による。

(2) 健全度を評価する際には、解析の目的に応じ、それがいつの時点のものであるかを明確にしておかなければならない。

(3) 矢板に孔が発生した場合、応力度は許容応力度以

内であっても裏込材が流出する恐れのあるほか、矢板の裏込側からの腐食が進行するため、健全度の評価に孔の発生を考慮する必要がある。

(4) 矢板の変位が制限される場合は、矢板変位の検討を行わなければならない。

6. 腐食対策工

6.1 一般

健全度の評価において健全でないとして評価された施設は、適切な対策を施さなければならない。

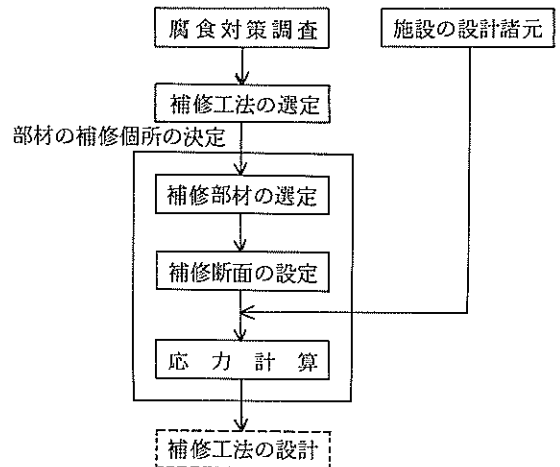
〔解説〕

(1) 健全でないとして評価された施設は、供用制限や防げん材取り付け位置の変更なども含め、防食工、部材の補修等の対策を施すか、または施設を更新する必要がある。

現施設に対策を施すか、施設を更新するかを判断するにあたっては次の事項を考慮する。

- ①腐食状況
- ②施設の利用状況
- ③施設の今後の利用計画
- ④施設の供用制限の可否
- ⑤補修工と更新の経済比較
- ⑥補修工法の信頼度、耐久性
- ⑦その他

(2) 本章においては、対策のうち部材の補修を主として取り扱う。補修工の検討は、一般に次に示す順序で行う。



6.2 腐食対策調査

6.2.1 一般

腐食対策調査においては補修部材の決定及び補修断面の設計のために鋼材の肉厚測定を行う。腐食の状態、構造様式、補修工法の設計法等に応じて適切に調査計画をたてなければならない。

〔解説〕

腐食対策調査は、腐食対策評価調査にもとづき、構造物の健全度を検討した結果、補修が必要とされる場合に行うもので、補修工法を施す部材の決定、補修断面の設計のため必要個所の肉厚を測定するものである。腐食の状態、構造様式、補修工法の設計法等に応じて個々の構造物ごとに調査計画をたてなければならないが、以下においてその標準を示した。

6.2.2 補修部材の決定のための調査

補修部材を決定するための調査は次を標準とする。

- (1) 栈橋の場合、腐食の状態から補修部材と判断できる場合を除いて、原則として補修対象ブロックの鋼杭全数の肉厚測定を行うものとする。
- (2) 矢板係船岸の場合、腐食の状態及び採用しようとする補修工法に応じて適宜定めるものとする。
- (2) 各鋼材の肉厚の測定個所としては、腐食評価調査にもとづき、最も肉厚が不足する点を一点とするものとする。
- (3) 肉厚測定点は腐食評価調査と同じとする。ただし、海側の凹の矢板については、腐食評価調査の結果により必要性を判断してよい。

〔解説〕

(1) 栈橋の場合、鋼杭の補修部分は応力の大きいところであり、十分な強度をもつように補修しなければならない。このため、補修工費は一般に相当高くなる。したがって、補修対象ブロック内については全数調査により各杭の補修の要否を決定することを原則とした。ただし、腐食評価調査の肉厚測定結果から、周辺の杭の腐食状態も補修を必要とするものであると推定できる場合は、行う必要はない。

(2) 肉厚測定を行う場合の測定個所は、腐食評価調査からわかった最も肉厚が不足する深度を一点としたが、状況によっては測定個所を追加して、危険な部材を安定であると判定しないように注意しなければならない。

6.2.3 補修断面の設計のための調査

補修断面の設計のための調査は次を標準とする。

- (1) 調査地点は、腐食評価調査にもとづき同一の補修断面を予定する区間について一個所とし腐食評価調査を行った部材とする。
- (2) 栈橋の鋼杭の鉛直方向の補修範囲の決定のためには、腐食評価調査において測定した-2 m付近での肉厚から判断して、-2 mよりも深くまで補修する必要がある場合のみ調査するものとする。この場合、-2 mよりも下に約50 cm間隔に補修する必要がない肉厚が得られるまで測定個所をとるものとする。矢板については、腐食の状態及び補修工法に応じて適宜定めるものとする。
- (3) 肉厚測定点は、6.2.2(3)に準ずるものとする。
- (4) その他検討しようとする補修工法の設計法に応じて、必要な個所の肉厚測定を行うものとする。

〔解説〕

(1) 補修断面の設計のための調査は、同一の補修断面を予定する区間について一個所としたが、栈橋の場合、法線直角方向にも同一の補修断面をとる場合は一本の杭でよい。

(2) 栈橋の鋼杭の場合、腐食に対して補修するのは杭頭部であって、補修範囲の上端は上部工下端であり、下端は一般には-2 m付近にまで及ぶと考えられる。そこで、腐食評価調査における-2 m付近での肉厚測定値より補修範囲の下端の位置が-2 m付近でとまるか更に深くまで補修しなければならないのか判断することにした。また、-2 mより深くなる場合は50 cm単位で下端を定めるものが実際的であると思われるので本文(2)のように定めた。

(3) 検討しようとする補修工法によっては、例えば母材断面を補修後の断面に見込んで設計するとか、溶接等の施工上から母材の肉厚を更に詳しく知る必要がある場合がある。設計法に応じて必要個所の肉厚測定を行うものとする。

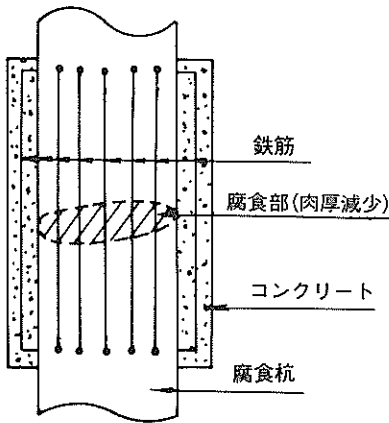
(4) 6.2.2及び6.2.3の調査は同時に行うものとする。また、可能であれば、腐食評価調査に引き続いて行うのが効率的である。

6.3 補修工法の選定

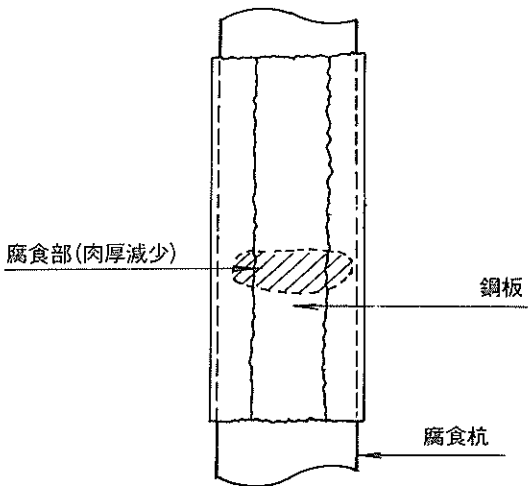
補修工法の選定に当たっては、鋼材腐食の状況、施設の利用計画、及び補修工法の施工性・経済性について検討を行い適切に選定する。

〔解説〕

(1) 港湾鋼構造物の腐食に対する補修工法については、まだ実施事例が少なく、現在、補修工法について開発・検討が進められているところである。補修工法としては、分類すると鉄筋コンクリートによる補強と鋼材の溶接による補強がある。



図一 25 (a) 鉄筋コンクリートによる補強



図一 25 (b) 鋼材の溶接による補強

(2) 鋼材の溶接による補強においては、現場での溶接が必要となるため、十分注意する必要がある。

6.4 部材の補修箇所決定

部材の補修箇所は、腐食状況及び部材応力を考慮して適切に決定する。

〔解説〕

(1) 補修部材の選定

栈橋における補修部材の選定にあたっては、表一 6 を参考にすることができる。補修箇所は、基本的には補修を施さない状態で部材強度が不足する部分とすればよい(方法①)。しかし、部材に補修を施すことによって部材の発生応力が変化するため、発生応力が許容応力を越す程度が小さい部材がある場合は、補修を施した状態で応力解析を行い、設計外力作用時にすべての部材が許容応力度を満足するように決定することが望ましい(方法②または③)。

矢板式構造物における補修部材の選定においては、部材強度が不足する矢板を補修矢板とする。

表一 6 栈橋の補修杭の選定方法

方法	補修杭の選定	腐食調査および腐食量等の設定
①	設計外力に対して、通常の栈橋の設計方法によって必要となる肉厚を求め、必要肉厚に対し肉厚が不足している部材を補修杭とする。	すべての杭の調査を行い、それぞれの腐食量を設定する。
②	ブロックごとに、法線平行方向の列単位で補修杭を選定し、補修後の応力解析を行って決定する。	すべての杭の調査を行い、法線平行方向の列単位で腐食量等を設定する。腐食量は、列における平均と端部の杭の腐食量を比較し、大きいほうの値とする。
③	ブロックごとに、任意の杭の組み合わせを検討し、最も補修本数が少なくなる組み合わせとする。	すべての杭の調査を行い、それぞれの腐食量を設定する。

(2) 補修断面の設定

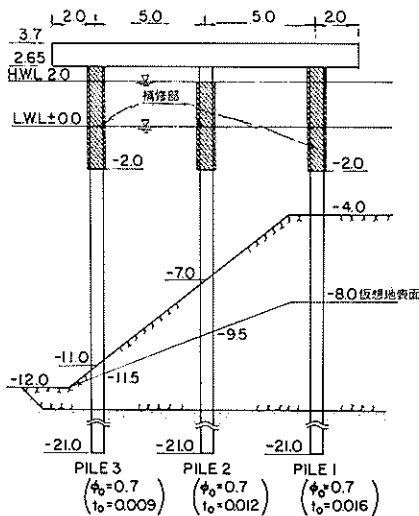
構造物の応力解析を変断面部材として行う場合は、補修した部分の断面設定を行う必要がある。補修工がない場合の解析結果を参考に補修範囲を決め、補修工法に応じて補修断面の弾性係数 E 、断面二次モーメント I 、断面係数 Z 、断面積 A を設定する。鉄筋コンクリートによる補修を行い、応力解析においては部材を鉄として取り扱う場合、 E は鉄の値とし、 I 、 Z 、 A は鉄に換算した値とする必要がある。なお、補修範囲は部材の応力集中を考慮し、余裕をもった範囲とすることが望ましい。

(3) 部材の応力計算

部材の応力計算は、補修を施していない部分の応力度を算定するとともに、補修工法の細部設計のためのデータ（曲げモーメント及び軸力）を得るために行う。部材の応力計算は、3. 鋼杭式構造物の発生応力、4. 鋼矢板式構造物の発生応力に準じて行うことができる。

栈橋において、補修杭の選定を表一6に示す方法②に従って行い、補修後の発生応力を算定する場合の手順は以下のとおりである。補修杭の選定を方法③によって行う場合は、応力解析は一般に有限要素法を用いることになり、かなり複雑な作業と大規模な計算が必要となる。

- ① 補修工がない場合の応力解析の結果から、栈橋の法線平行方向の列単位で補修杭を選定する。
- ② 杭の鉛直方向の補修範囲を仮定し、補修断面の I 、 Z 、 A を設定し、杭のモデル化を行う。
- ③ 応力解析を表一2に示すMethod 5によって行う。応力解析を「技術基準」を準用する方法によって行う場合、Method 5以外の方法によると誤差が大きくなり、補修後の応力解析を行う意味がなくなる。



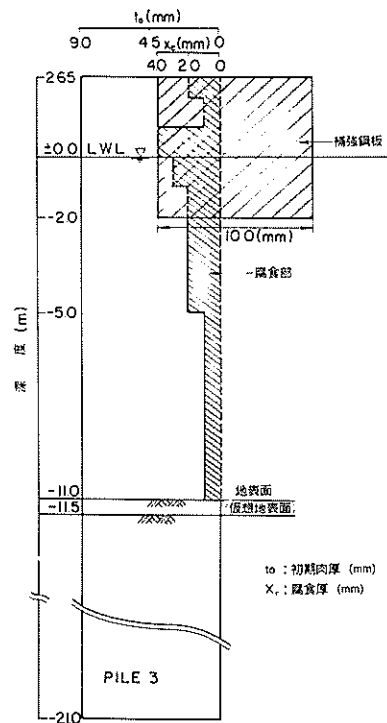
図一26 各杭の補修範囲

- ④ 補修を施していない杭と、補修杭の補修を施していない範囲の発生応力が許容応力を満足している場合、仮定した補修範囲を補修箇所として決定する。許容応力を越える部材がある場合は①または②にもどって④までをくり返す。

(4) 補修杭が他の杭の応力に及ぼす影響

栈橋において、一部の部材に補修を施すと、他の部材の応力は軽減される。図一18,19に示す栈橋について、図一26,27に示す部材の補修を行うものとして応力解析を行った結果を表一7及び図一28～30に示す。補修方法は、杭上端から-2.0mの範囲を鋼板溶接するものである。補修杭の組み合わせは、CASE 1は補修なし、CASE 2, 3は1列を補修、CASE 4～6は2列を補修、CASE 7は全列を補修である。

この計算例では、偏心なしの水平力を加えた場合（図一28）、1列を補修すると補修のない杭の応力は5～9%程度減少し、2列の補修では12～13%減少している。偏心ありの水平力を加えた場合（図一29）1列補修では8～11%、2列補修では14～17%減少している。また地震時（図一30）においては1列補修では6～9%、2列補修では13～14%の減少となっている。



図一27 補修杭のモデル化

表一 7 杭の補修効果の計算結果

補修ケース	荷重条件			H = 55.0 (t) 偏心なし			H = 55.0 (t) 偏心あり			震度 0.2 注3)		
	注1) PILE No	σ_{max} (kg/cm ²)	σ_{max} の発生位置杭頭からの距離 (m)	σ_{ij}/σ_{ij}	注2)	σ_{max} (kg/cm ²)	σ_{max} (kg/cm ²)	σ_{ij}/σ_{ij}	σ_{max} (kg/cm ²)	σ_{max} の発生位置杭頭からの距離 (m)	σ_{ij}/σ_{ij}	σ_{ij}/σ_{ij}
CASE-1	1	1336.0	0.0	1.0	1.0	2375.0	0.0	1.0	3110.0	0.0	1.0	1.0
	2	1344.0	1.65	1.0	1.0	2176.0	1.65	1.0	2864.0	1.65	1.0	1.0
	3	1488.0	1.65	1.0	1.0	2403.0	1.65	1.0	3026.0	1.65	1.0	1.0
CASE-2	1	1269.0	0.0	0.95	0.95	2196.0	0.0	0.93	2923.0	0.0	0.93	0.94
	2	1283.0	1.65	0.96	0.96	2020.0	1.65	0.93	2661.0	1.65	0.93	0.93
	③	1054.0	4.65	0.71	0.71	1656.0	4.65	0.56	2180.0	4.65	0.56	0.72
CASE-3	①	991.0	0.0	0.74	0.74	1771.0	0.0	0.75	2363.0	0.0	0.75	0.76
	2	1224.0	1.65	0.91	0.91	1939.0	1.65	0.89	2614.0	1.65	0.89	0.91
	3	1398.0	1.65	0.94	0.94	2204.0	1.65	0.92	2752.0	1.65	0.92	0.91
CASE-4	1	1182.0	0.0	0.88	0.88	2032.0	0.0	0.85	2695.0	0.0	0.85	0.87
	②	914.0	4.65	0.68	0.68	1406.0	4.0	0.65	1902.0	0.0	0.65	0.66
	③	989.0	4.65	0.67	0.67	1527.0	4.65	0.64	2042.0	4.65	0.64	0.68
CASE-5	①	923.0	0.0	0.69	0.69	1637.0	0.0	0.69	2184.0	0.0	0.69	0.70
	②	877.0	4.65	0.65	0.65	1357.0	0.0	0.62	1849.0	0.0	0.62	0.65
	3	1317.0	1.65	0.89	0.89	2033.0	1.65	0.85	2589.0	1.65	0.85	0.86
CASE-6	①	946.0	0.0	0.71	0.71	1647.0	0.0	0.69	2234.0	0.0	0.69	0.72
	2	1174.0	1.65	0.87	0.87	1813.0	1.65	0.83	2446.0	1.65	0.83	0.85
	③	996.0	4.65	0.67	0.67	1533.0	4.65	0.64	1996.0	4.65	0.64	0.66
CASE-7	①	884.0	0.0	0.66	0.66	1534.0	0.0	0.65	2075.0	0.0	0.65	0.67
	②	846.0	4.65	0.63	0.63	1268.0	0.0	0.58	1742.0	0.0	0.58	0.61
	③	942.0	4.65	0.63	0.63	1425.0	4.65	0.59	1884.0	4.65	0.59	0.62

注1) ○で囲った杭は、補修杭である。

注2) σ_{ij} は、CASE-1における杭 j に発生する最大応力を示す。

注3) PILE 1の応力は、海側から陸側へ地震力が作用したときの値を、PILE 2、PILE 3の応力は陸側から海側へ地震力が作用したときの値を記入した。
(地震力により、杭に発生する軸方向分担力が圧縮になるほうの値を記入した。)

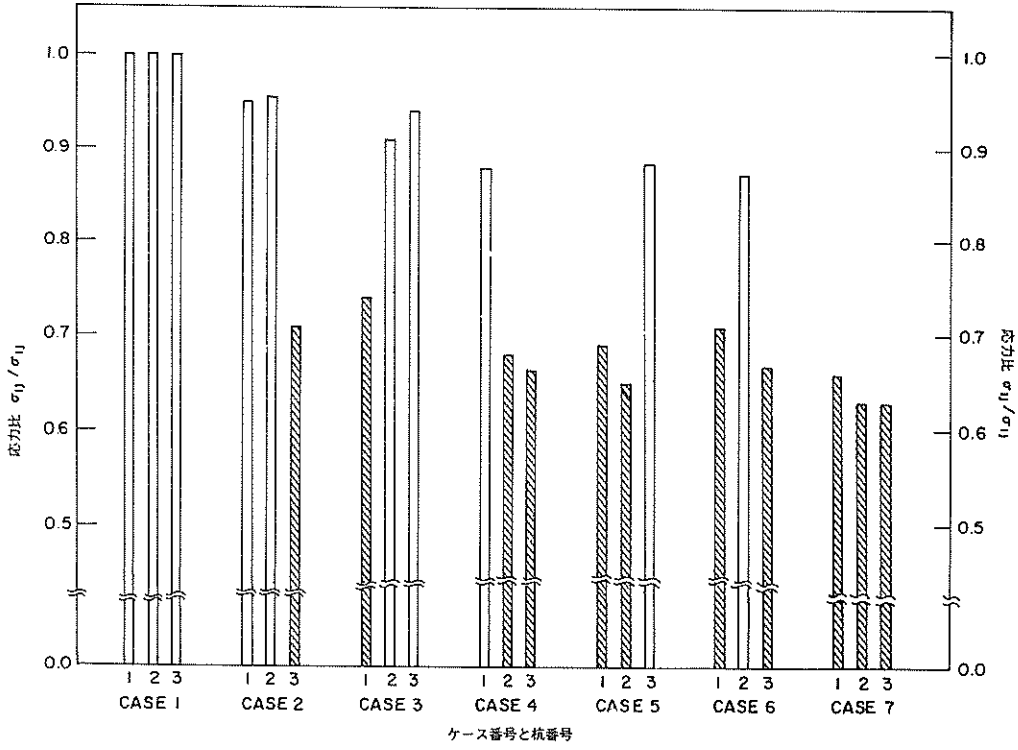


図-28 補修杭が他の杭の応力に及ぼす影響 (1) 斜線は補修杭を示す。
(水平力 $H = 55 (tf)$; 偏心なし)

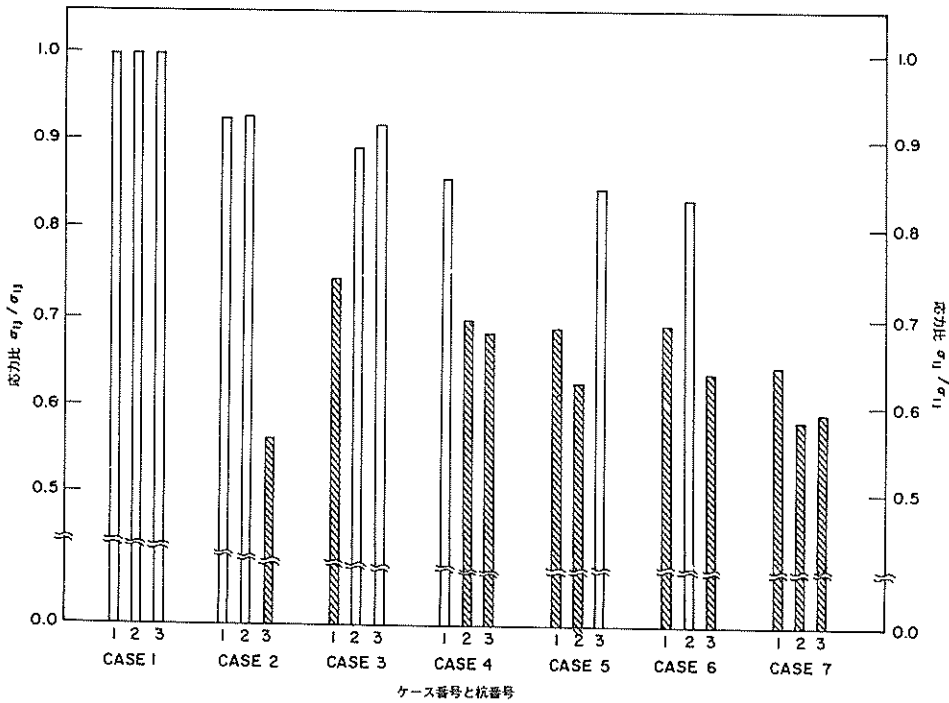
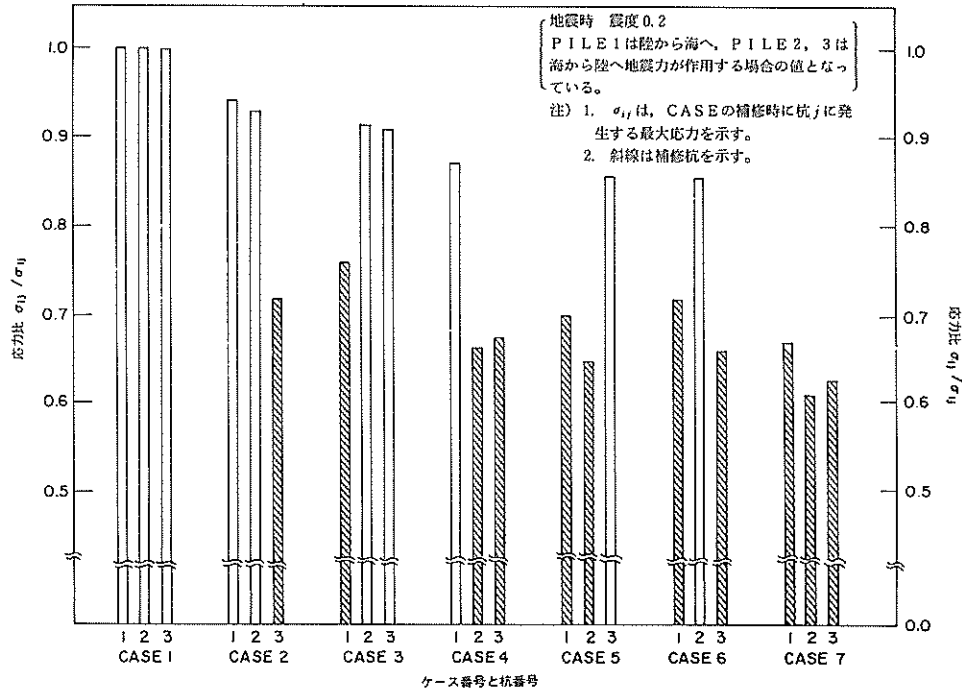


図-29 補修杭が他の杭に及ぼす影響 (2) 斜線は補修杭を示す。
(水平力 $H = 55.0 (tf)$ 偏心荷重)



図一 30 補修杭が他の杭の応力に及ぼす影響(3) 斜線は補修杭を示す。

あ と が き

港湾鋼構造物の腐食問題の顕在化に伴い施設の健全度の評価が実施されるなどの事情を考慮し、本稿は、健全度の評価と、そのために必要となる腐食調査方法及び発生応力の計算方法について参考資料のとりまとめを行ったものであり、実務において参考になると考えている。

本稿においては、腐食調査では標準的な調査方法を示し、応力計算方法では基本的な考え方を示すとともに簡略解法及び厳密解法について計算方法及び計算誤差の解説を行った。このため、実務においては、腐食状況に応じて適切な腐食調査と応力計算を行うために、いくつかの技術的判断を行う必要がある。これらについては、本稿を参考として実務担当者に適切に判断を行うことが要請される。

本稿の作成過程は、各著者から分担執筆したものを相互調整を行ってまとめたものである。作成までの段階において、中山茂雄氏（運輸省港湾局技術課技術指導官）、大内久夫氏（同補佐官）、青木道雄氏（同技術基準第二係

長）、大堀晃一氏（運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長）、上田 寛氏（同次長）、武山秀夫氏（同建設専門官）から有益な助言をいただいた。第一次原稿完成後、前記の関係者より内容を討議していただき、その結果をふまえて加筆調整を行ったものが本稿である。このように本稿は多くの関係者の意見を参照しつつ作成されたものであり、作成過程で多くの関係者から協力を得られたことに対し謝意を表します。

（1984年9月29日受付）

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修；港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，昭和54年3月。
- 2) 北島昭一，他5名；港湾構造物設計基準作成にあたっての諸問題について（その2），港湾技研資料No. 59，1968年，pp. 40～44。
- 3) 文献2），pp. 25～36。
- 4) 運輸省港湾局；棧橋・ドルフィンの設計法，調査設計室報告 第2報，1962年，pp. 33～35。

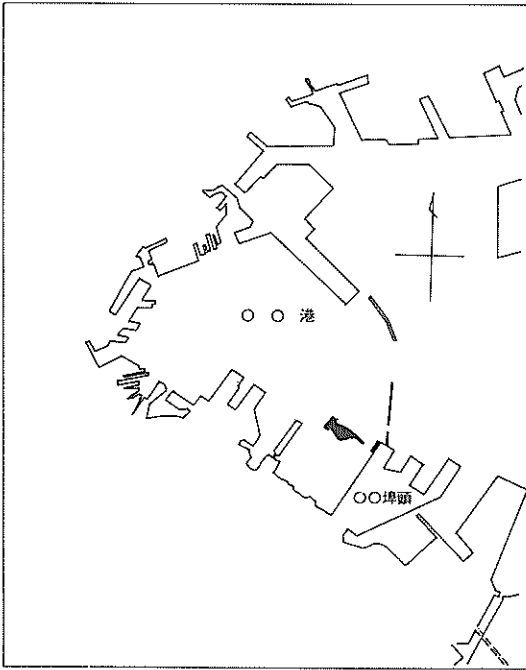
付 録

1. 目視観察結果の記入例
2. 肉厚測定結果の記入例
3. 腐食状況の写真
4. チャンの方法による変断面杭の弾性方程式
5. 腐食時の鋼矢板の断面係数
6. 腐食時の鋼矢板の断面 2 次モーメント

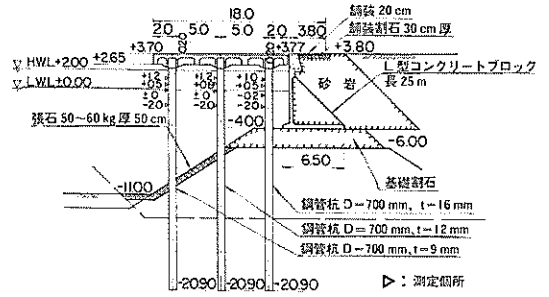
付録 1

付表-1 「目視観察」調査票記入例

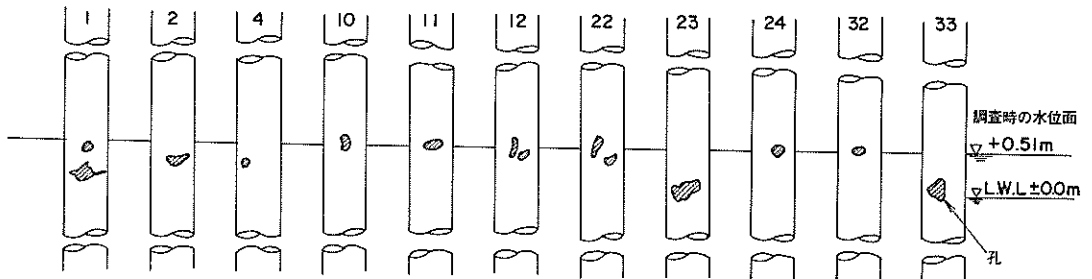
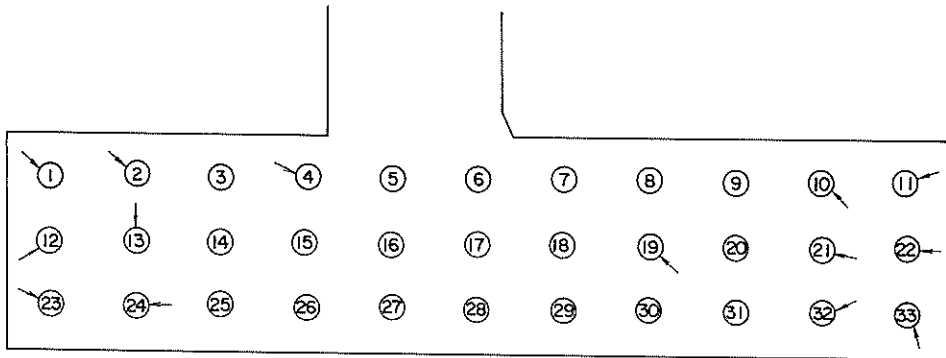
港名	〇〇港（〇〇地区）	
施設名	〇〇ふ頭〇号岸壁（位置図 付図-1）	
構造形式	直杭式栈橋（断面図 付図-2）	
計画水深	-〇〇m	
施設延長	〇〇m	
供用開始時期	〇〇年〇〇月	
潮位	H.W.L +〇.〇m, M.S.L +〇.〇m, M.L.W.L +〇.〇m, L.W.L 〇.〇m	
鋼材の種類・形状	鋼管杭 ϕ 〇〇〇.〇m/m, t=〇m/m	
鋼材露出部分上端高	+〇.〇m	
防食法	電気防食（流電陽極）	
調査年月日	水面上 〇〇年〇月〇日	水中部 〇〇年〇月〇日
天候	晴	晴
調査時の潮位	+ 0.05 m	+ 0.5 m
観察範囲	± 0.0 mより上	± 0.0 ~ - 2.0 m
視察者	〇〇〇〇	〇〇〇〇
腐食の状況	ほぼ全部の杭が± 0.0 ~ + 0.7 m付近にかけて、全周に赤橙色のさびがみられる。	
孔の有無	± 0 ~ + 0.5 m付近に孔のあいた杭11本（付図-3, 写真参照）	
付着物の状況	+ 0.7 m付近より上は、ほぼ付着物（貝殻）におおわれているが、± 0 ~ + 0.7 mは付着物が少く露出部は赤橙色に腐食している。	
その他特記事項		
写真	施設全体〇葉, 腐食箇所〇葉（撮影箇所は付図-3参照）	
備考		



付図一 調査位置図

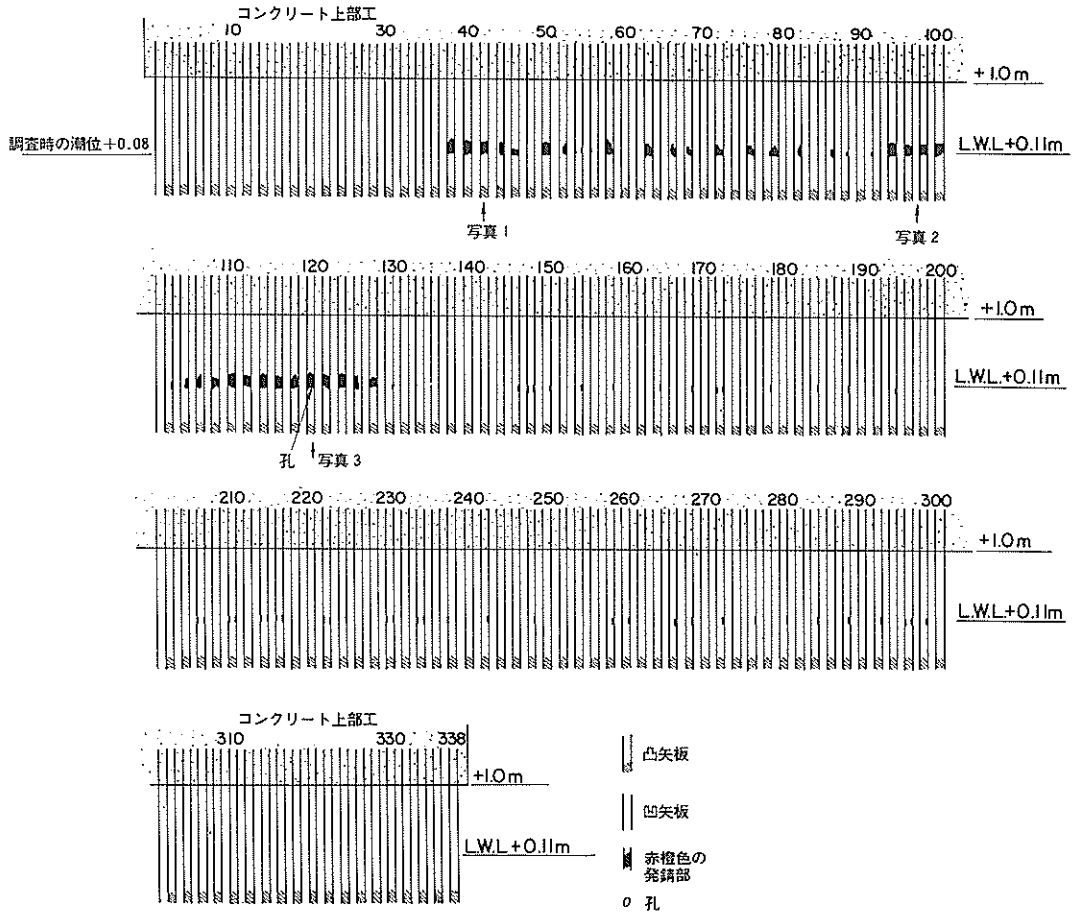


付図一 2 断面図



※矢印は穴のあいている方向を示す。(写真撮影箇所)

付図一 3 目視観察結果 (杭の場合)

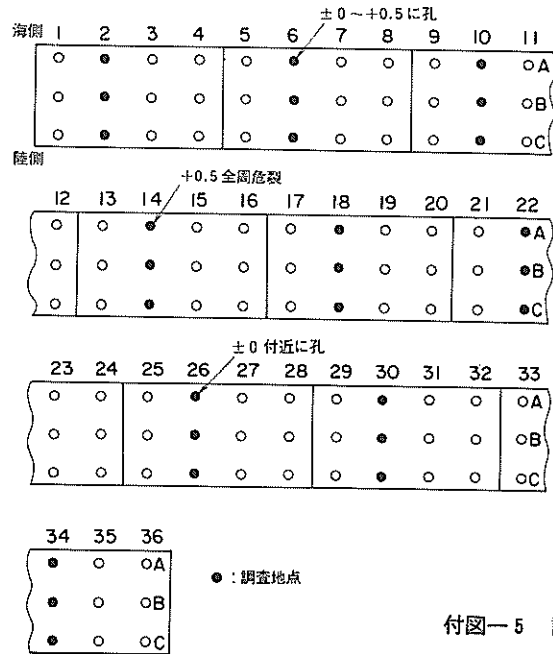


付図一 4 目視観察結果(矢板の場合)

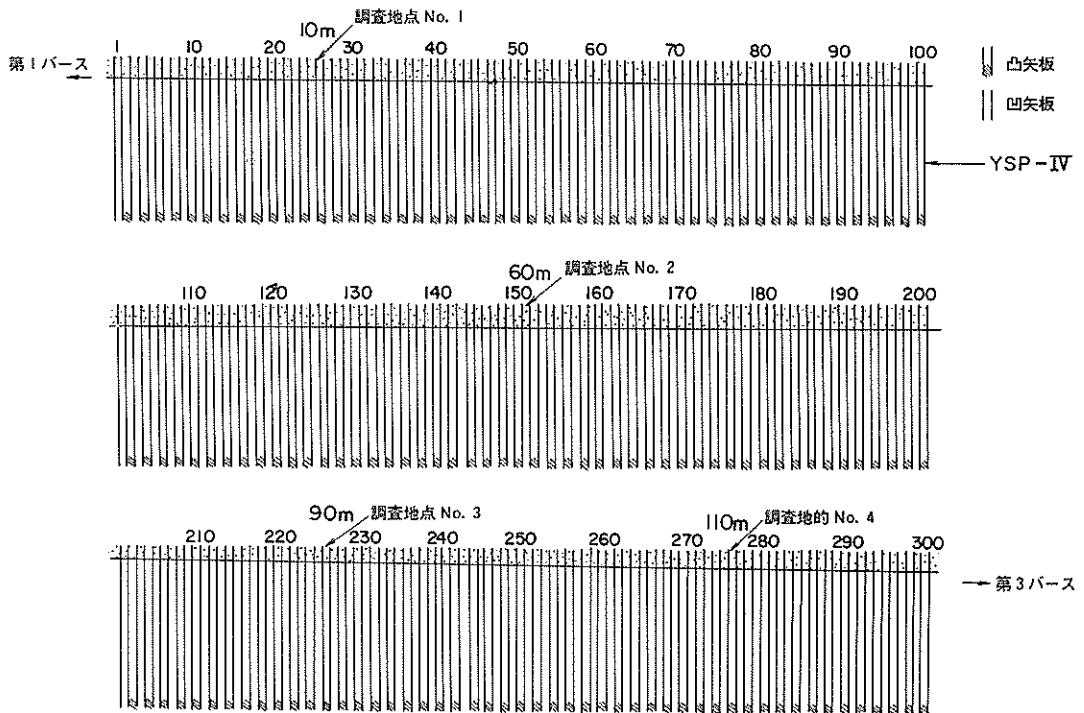
付録 2

付表-2 「肉厚測定」調査票記入例

港名	〇〇港 (〇〇地区)
施設名	〇〇ふ頭〇号岸壁 (位置図 付図-1)
構造形式	直杭式栈橋 (断面図 付図-2)
計画水深	-10 m
施設延長	185 m
潮位	H.W.L +〇.〇m, M.S.L +〇.〇m, M.L.W.L +〇.〇m, L.W.L 〇.〇m
調査鋼材の種類・形状	鋼管杭φ711.2 m/m, (t = 12.7 m/m前中列, t = 16 m/m後列)
鋼材露出部分上端高	+〇.〇m
鋼材現地打設時期	44年8月※1 (月までわからない時は〇月~〇月でも可)
防食法の有無	☑, 無
防食法の種類	電気防食 (方式: 流電陽極式, 陽極設計寿命20年), 防食被覆 (種類 , 被覆範囲)
電気防食適用期間	45年2月※2 ~継続中
腐食期間	無電防期間1年6ヶ月 (1.5年) (※2と※1の差) 電防期間14年4ヶ月 (14.3年) (※3と※2の差)
測定年月日	59年6月1日※3
天候	晴
測定者	所属〇〇K.K 氏名 〇〇 〇〇
使用厚み計	〇〇社製〇〇型
調査地点	付図-5 測定個所 付図-2
肉厚測定点のNo.の表示	
腐食状況	全長にわたって±0~+0.5 m付近に赤橙色のさびがみられ孔のあいているもの2本, 亀裂のあるもの1本 (付図-5 参照)
備考	



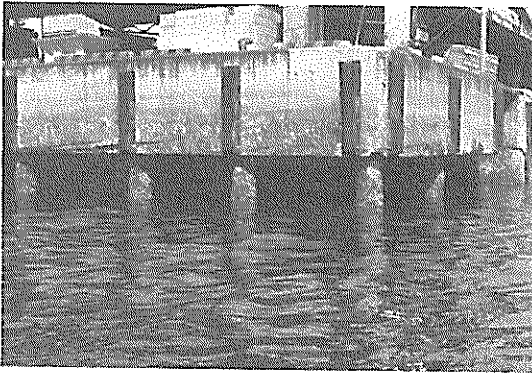
付図一 5 調査地点位置 (杭の場合)



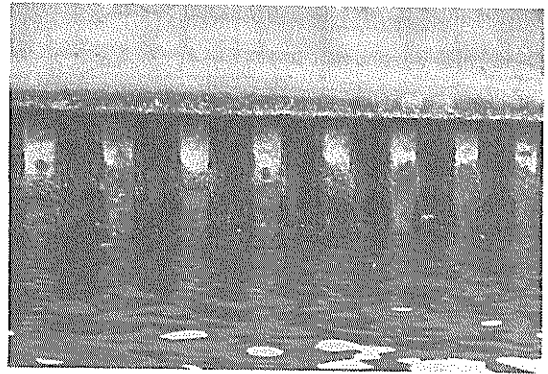
付図一 6 調査地点位置 (矢板の場合)

付表—3 肉厚測定値記入例

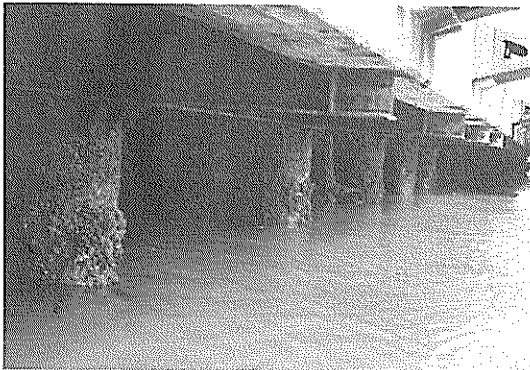
調査地点 No.	測定箇所 (m)	肉厚測定点 No.	初期肉厚 T_1 (mm)	現在肉厚 T_2 (mm)					腐食量 $T_1 - T_2$ (mm)	腐食速度 (mm/yr)	備考
				1回	2回	3回	平均	平均			
No. 3	±0.0	1	12.7	1	11.76	11.74	11.75	11.75	11.75	0.12	無防食 経過 8.5年
				2	12.02	12.03	12.09	12.04			
				3	11.77	11.75	11.76	11.76			
				4	10.95	10.94	10.95	10.95			
				5	11.86	11.90	11.93	11.89			
				平均	—	—	—	11.67	1.03		
"	"	2	"	1	10.06	10.05	10.05	10.05	0.21	"	
				2	11.59	11.61	11.58	11.59			
				3	11.02	11.98	10.99	11.33			
				4	10.81	10.83	10.82	10.82			
				5	10.65	10.66	10.68	10.66			
				平均	—	—	—	10.89			1.81
"	"	3	"	1	9.30	9.32	9.37	9.33	0.37	"	
				2	9.14	9.13	9.14	9.14			
				3	9.66	9.76	9.76	9.72			
				4	10.01	10.02	10.01	10.01			
				5	9.73	9.79	9.84	9.78			
				平均	—	—	—	9.59			3.11
"	"	4	"	1	10.53	10.57	10.51	10.53	0.26	"	
				2	10.19	10.20	10.19	10.19			
				3	10.82	10.77	10.80	10.79			
				4	11.06	11.04	11.06	11.05			
				5	10.03	10.05	10.07	10.05			
				平均	—	—	—	10.52			2.18
平均	—	—	—	10.65	2.05						
平均	—	—	—	10.82	1.88						
平均	—	—	—	10.94	1.76						
平均	—	—	—	10.94	0.21						



写真一 1
広範囲に連続して赤橙色のさびがみられる
状態の鋼管杭



写真一 4
広範囲に連続して赤橙色のさびがみられる
状態の鋼矢板面



写真一 2
部分的に赤橙色のさびがみられる状態の
鋼管杭



写真一 5
部分的に赤橙色のさびがみられる状態の
鋼矢板面



写真一 3
赤橙色のさびがごくわずかしかみられない
状態の鋼管杭



写真一 6
赤橙色のさびがごくわずかしかみられない
状態の鋼矢板面

付録4 チャンの方法による変断面杭の弾性方程式

(1) チャンの方法による杭の弾性方程式

「技術基準」第5編4.3.4に示されているとおり、チャンの方法によると、杭の弾性方程式は次のようになる。

下図において地表面に座標軸の原点をとり、杭の深さ方向に x 軸、杭のたわむ方向に y 軸をとると、杭の満足すべき微分方程式として次式が得られる。

地上部分 $EI \frac{d^4 y_1}{dx^4} = 0$

地中部分 $EI \frac{d^4 y_2}{dx^4} + E_s y = 0$

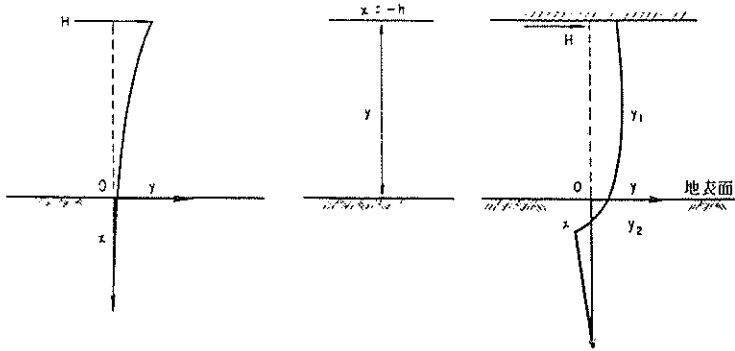
$E_s = B k_k$

k_k ; 横地盤反力係数 (kgf/cm³)

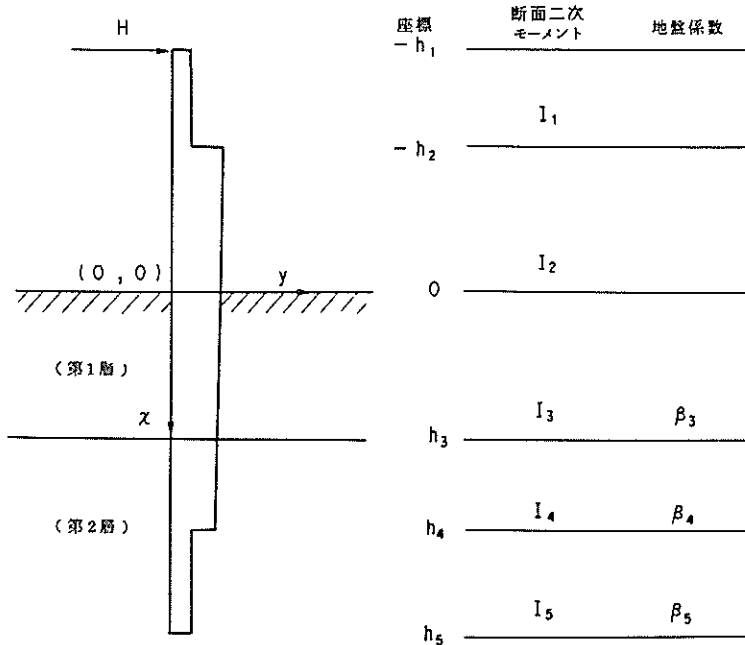
B ; 杭の幅 (cm)

E_s ; 地盤弾性係数…… (kgf/cm²)

(2) 多層地盤における変断面杭のチャンの方法の適用
 下図に示すような多層地盤における変断面杭を、チャンの方法により解析するには、以下のとおりに行えばよい。



チャンの方法による弾性方程式



地層と杭の断面変化の伴う境界条件

① 地上部

弾性方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = 0$$

一般解

$$-h_1 \leq x \leq -h_2$$

$$y_1 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

$$-h_2 \leq x \leq 0$$

$$y_2 = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$$

..... (1)

境界条件

$$x = -h_1 \text{ において}$$

杭頭固定の場合

$$y_1' = 0$$

$$y_1''' = -H$$

..... (2)

杭頭自由の場合

$$y_1'' = 0$$

$$y_1''' = -H$$

..... (3)

$$x = -h_2 \text{ において}$$

$$y_1 = y_2$$

$$y_1' = y_2'$$

$$I_1 y_1'' = I_2 y_2''$$

$$I_1 y_1''' = I_2 y_2'''$$

..... (4)

② 地中部

弾性方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y = 0$$

一般解

$$0 \leq x \leq h_3$$

$$y_3 = e^{\beta_3 x} (A_3 \cos \beta_3 x + B_3 \sin \beta_3 x) + e^{-\beta_3 x} (C_3 \cos \beta_3 x + D_3 \sin \beta_3 x)$$

$$h_3 \leq x \leq h_4$$

$$y_4 = e^{\beta_4 x} (A_4 \cos \beta_4 x + B_4 \sin \beta_4 x) + e^{-\beta_4 x}$$

..... (5)

$$(C_4 \cos \beta_4 x + D_4 \sin \beta_4 x)$$

$$h_4 \leq x \leq h_5$$

$$y_5 = e^{\beta_5 x} (A_5 \cos \beta_5 x + B_5 \sin \beta_5 x) + e^{-\beta_5 x}$$

$$(C_5 \cos \beta_5 x + D_5 \sin \beta_5 x)$$

境界条件

$$x = 0 \text{ において}$$

$$y_2 = y_3$$

$$y_2' = y_3'$$

$$I_2 y_2'' = I_3 y_3''$$

$$I_2 y_2''' = I_3 y_3'''$$

..... (6)

$$x = h_3 \text{ において}$$

$$y_3 = y_4$$

$$y_3' = y_4'$$

$$I_3 y_3'' = I_4 y_4''$$

$$I_3 y_3''' = I_4 y_4'''$$

..... (7)

$$x = h_4 \text{ において}$$

$$y_4 = y_5$$

$$y_4' = y_5'$$

$$I_4 y_4'' = I_5 y_5''$$

$$I_4 y_4''' = I_5 y_5'''$$

..... (8)

$$x = h_5 \text{ において}$$

$$x = \infty \text{ とできる場合}$$

$$y_5 = 0$$

$$y_5' = 0$$

..... (9)

有限長とする場合

$$x = h_5$$

$$I y_5'' = 0$$

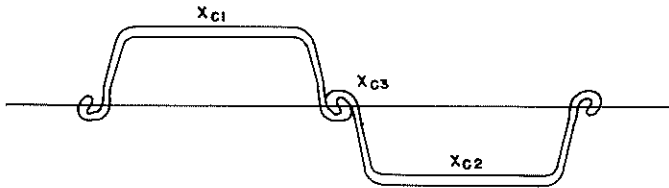
$$I y_5''' = 0$$

..... (10)

以上より未知数に対して連立方程式を解き、未知係数を求め、変位量、たわみ角、曲げモーメント、せん断力を求めればよい。

付録 5 腐食時の鋼矢板の断面係数 (新日本製鐵株式会社提供)

SEA SIDE



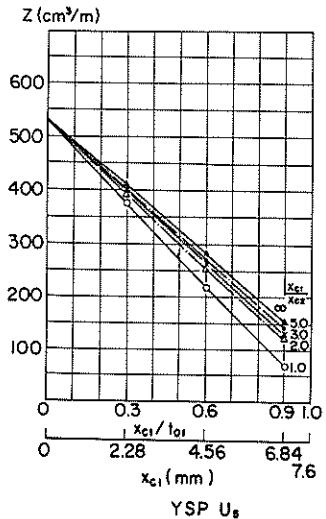
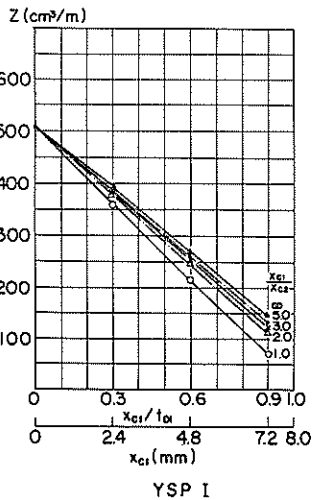
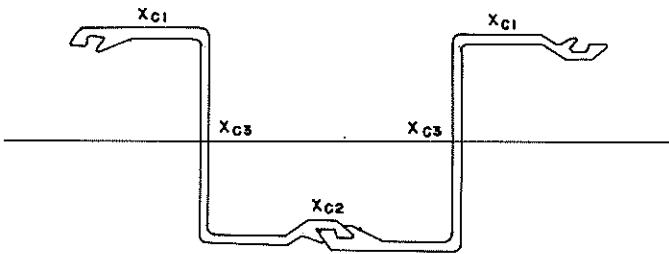
t_{01} --- U形鋼矢板 WEB 初期肉厚
Z形鋼矢板 FLANGE 初期肉厚

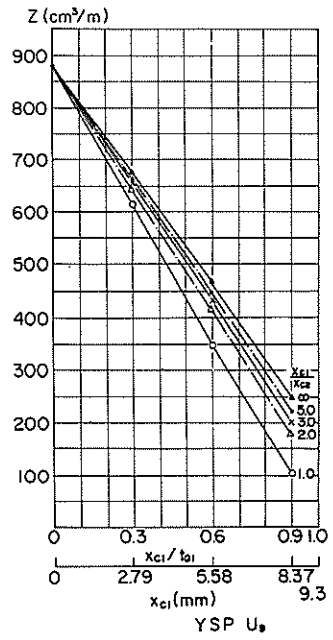
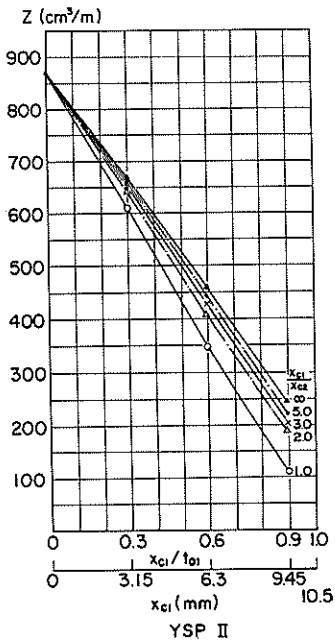
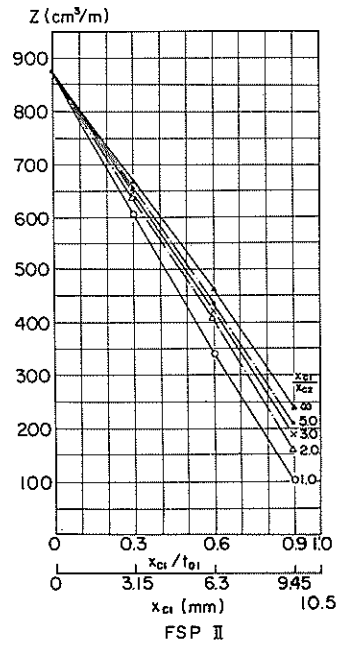
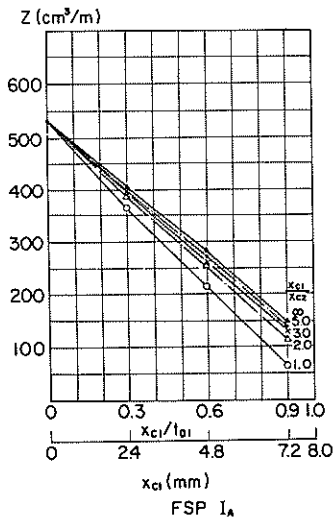
x_{c1} --- 海側腐食量

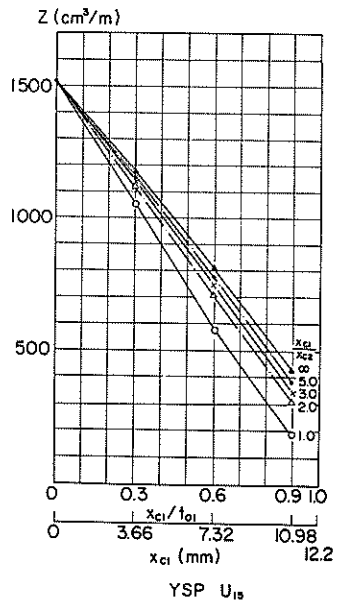
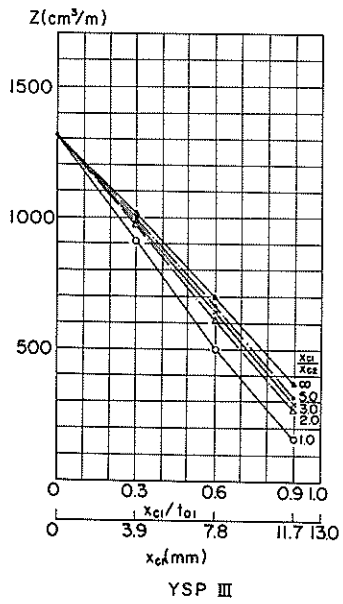
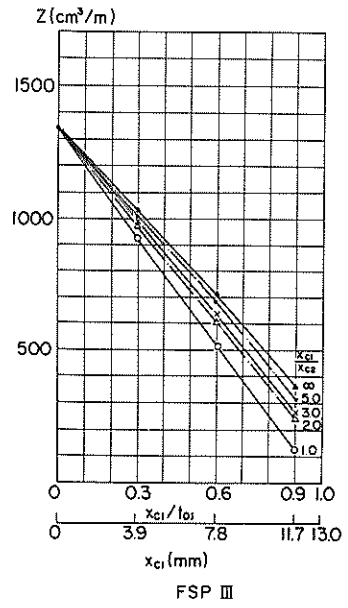
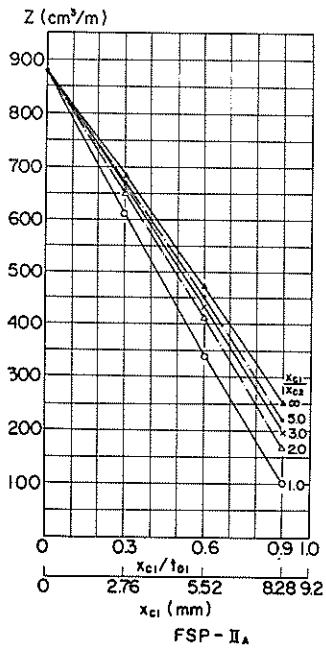
x_{c2} --- 陸側腐食量

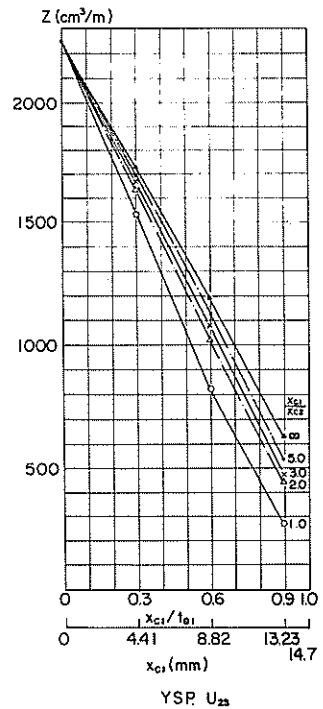
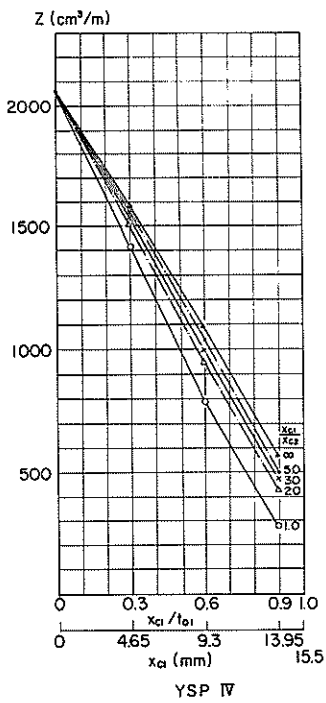
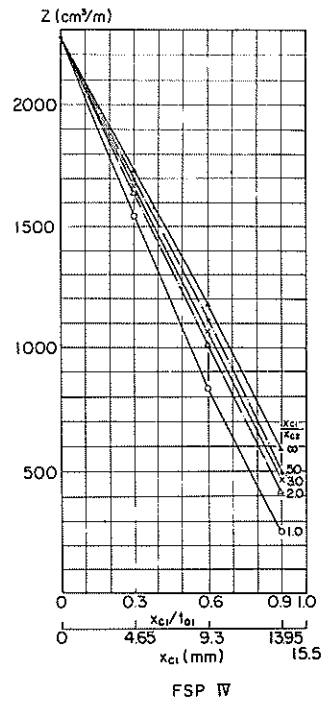
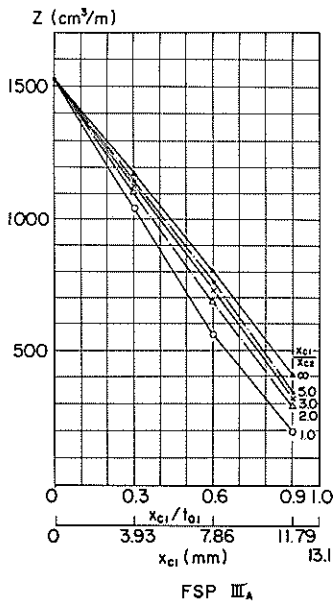
x_{c3} --- 側面腐食量

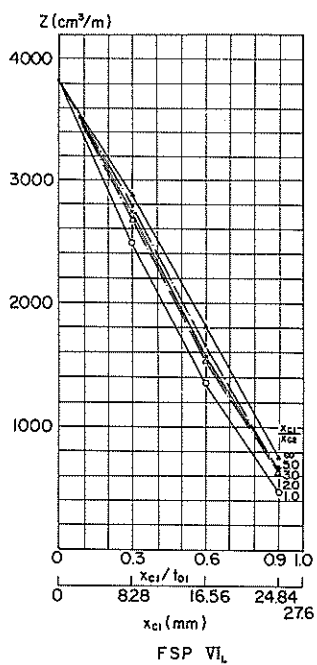
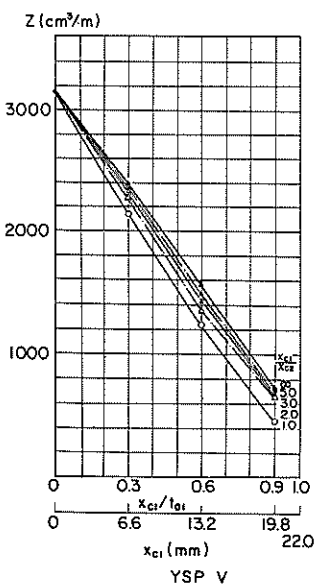
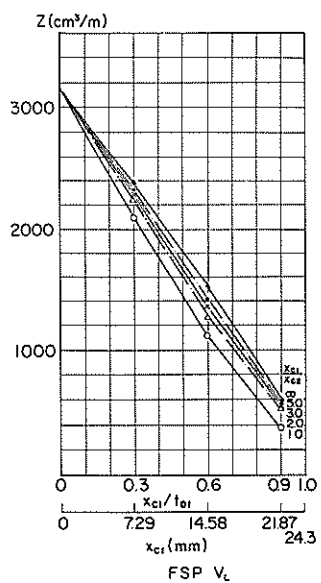
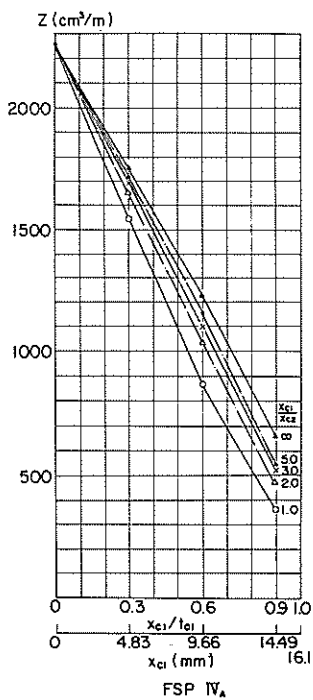
SEA SIDE

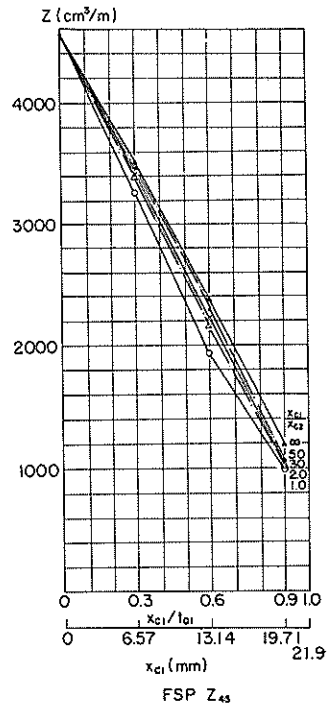
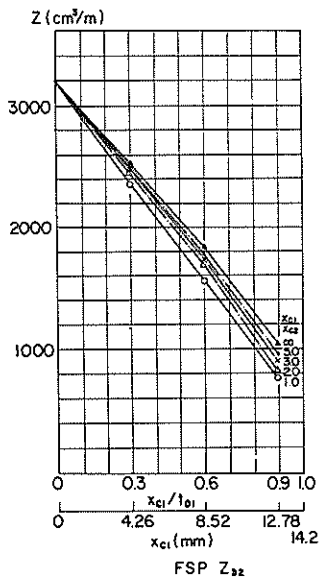
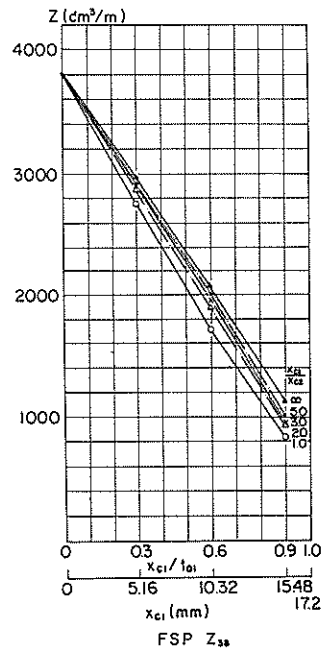
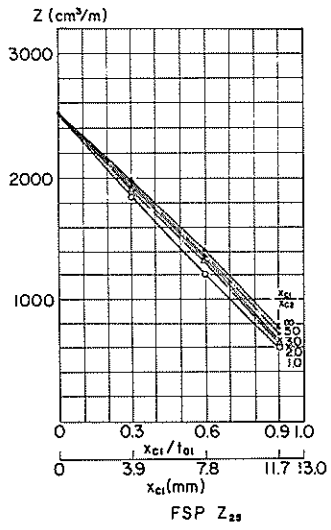




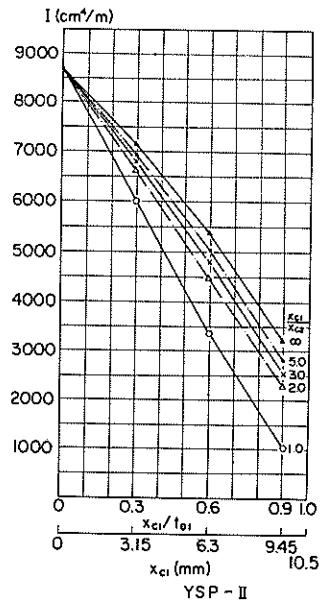
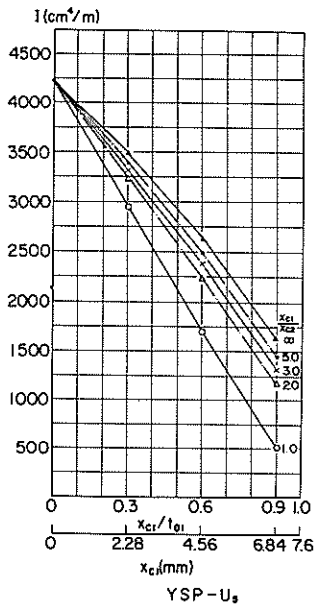
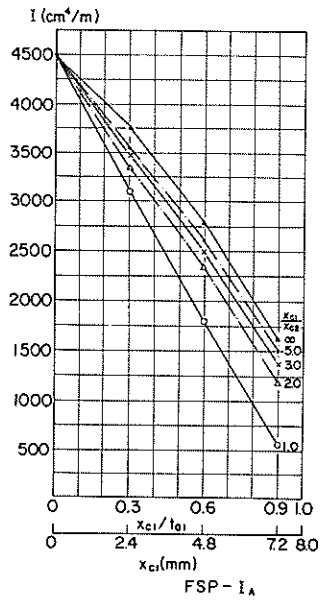
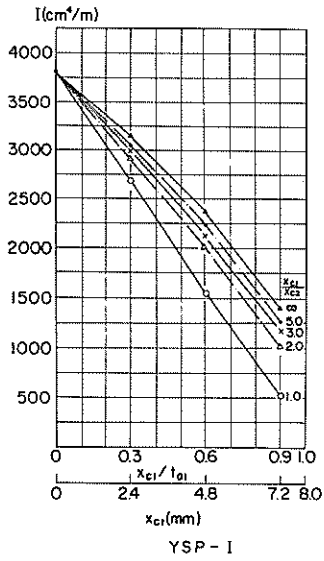


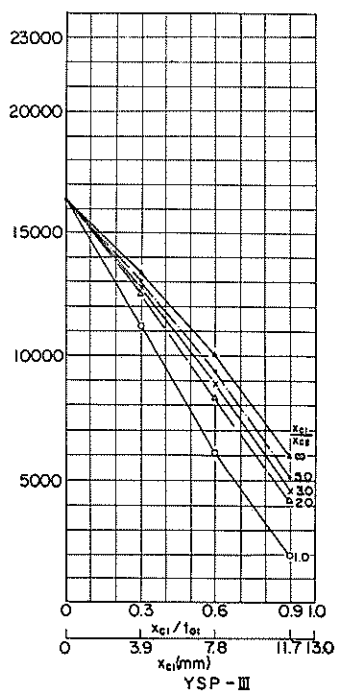
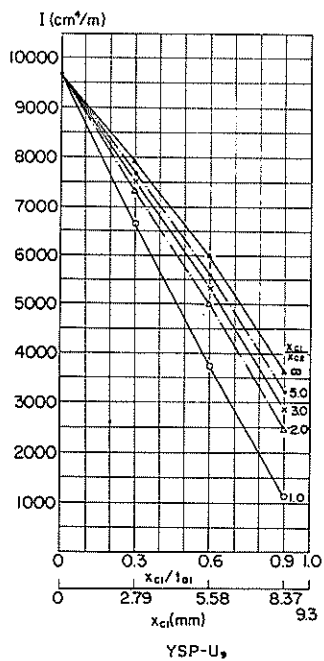
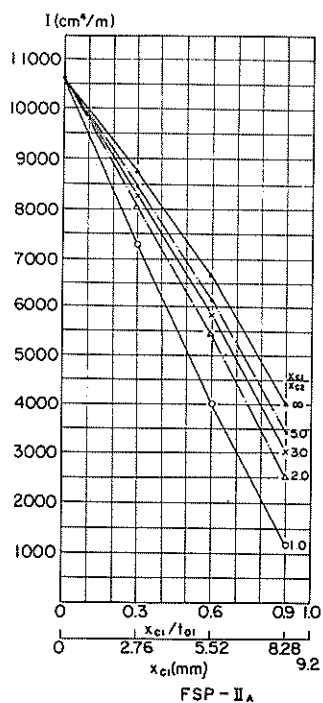
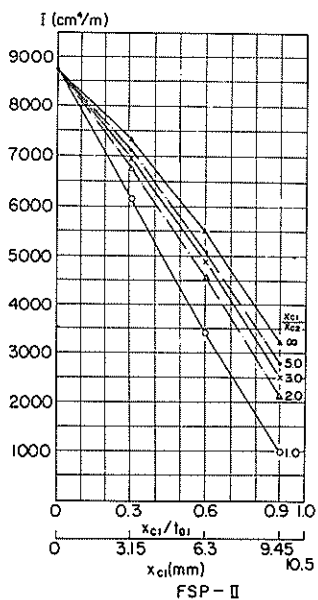


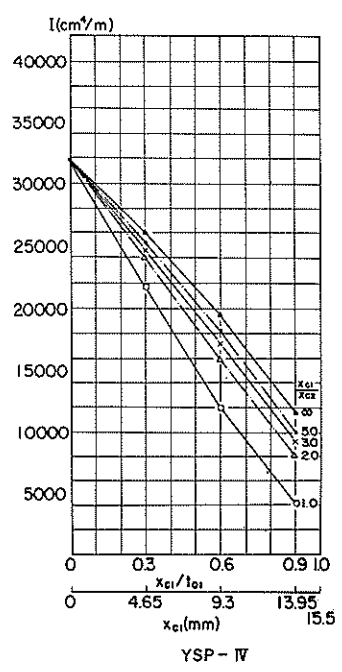
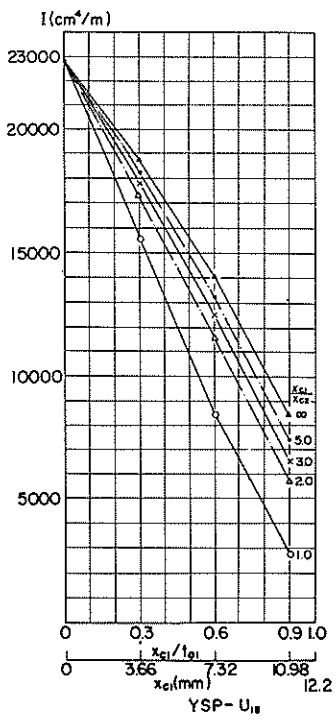
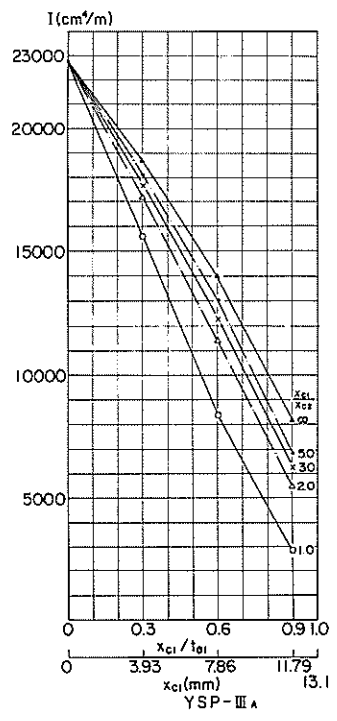
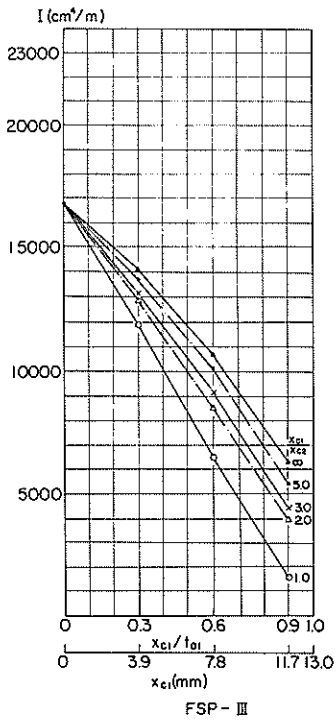


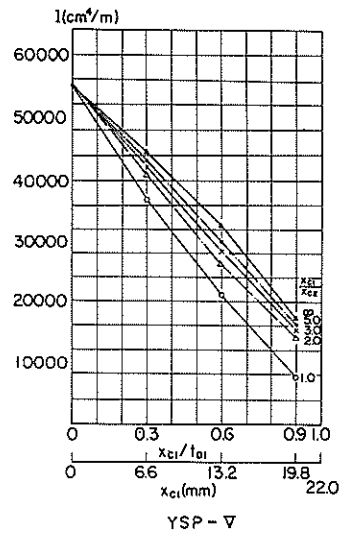
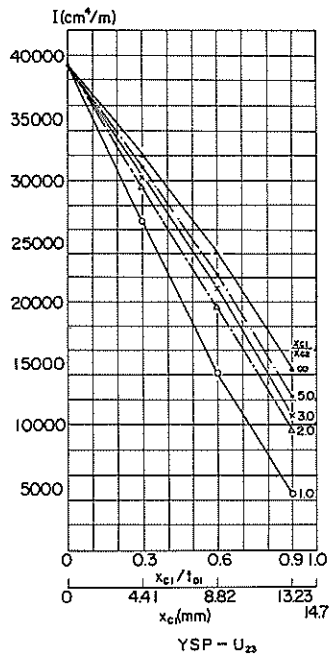
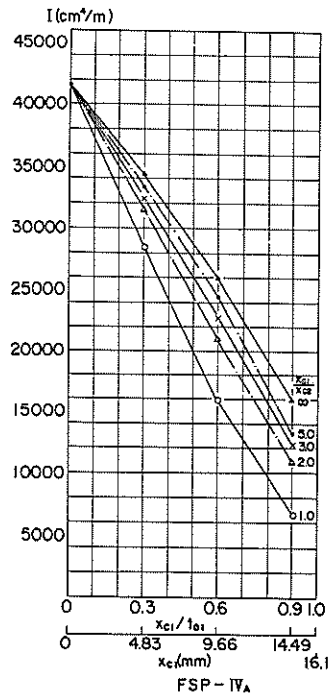
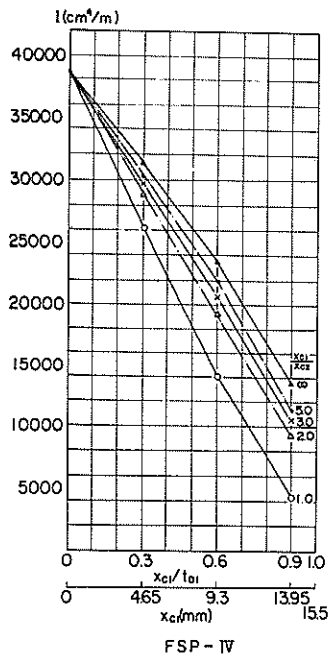


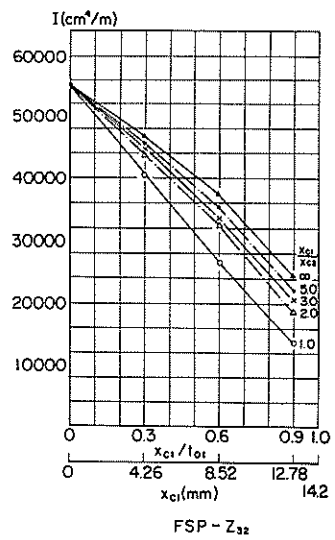
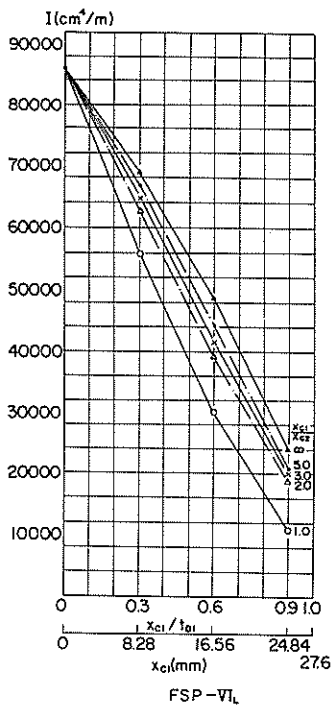
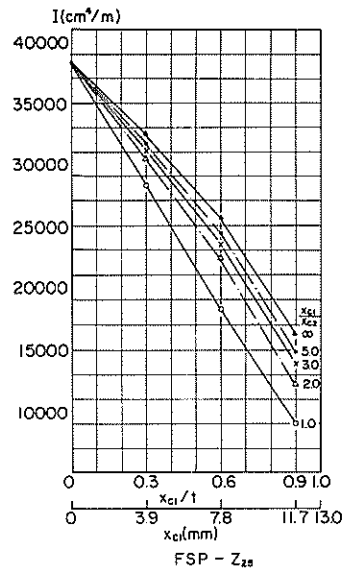
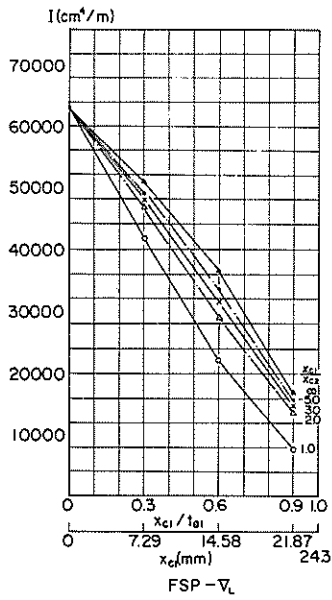
付録 6 腐食時の鋼矢板の断面 2 次モーメント (新日本製鐵株式会社提供)

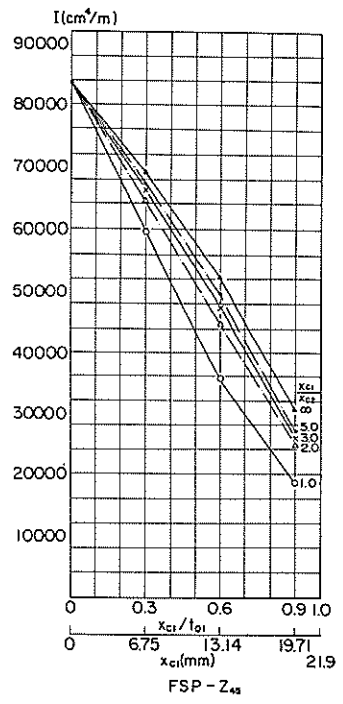
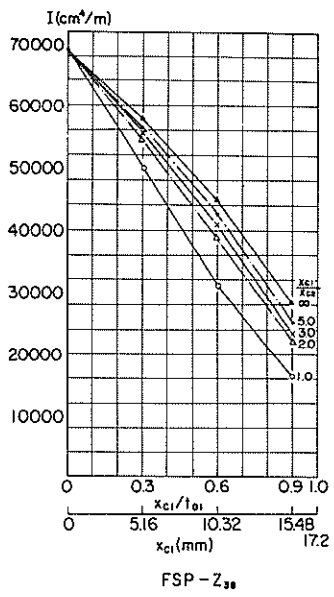












港湾技研資料 No. 501

1984・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 幸商事株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.