

港湾技研資料

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

No. 780

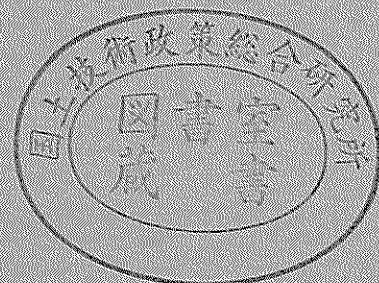
Sept. 1994

矢板式係船岸の構造諸元などに関する統計的分析

岩 崎 直 晃

長 尾 毅

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 矢板式係船岸の特徴	4
2.1 係留施設全体との比較	4
2.2 矢板を用いた係留施設との比較	5
3. 矢板式係船岸の構造諸元などの決定過程	6
3.1 矢板式係船岸の設計手順	6
3.2 矢板壁の設計法	7
4. 設計事例による構造諸元の分析	8
4.1 矢板壁に関する構造諸元	8
4.2 タイ材に関する構造諸元	11
4.3 控え工に関する構造諸元	12
5. 矢板壁の設計法の違いによる構造諸元の分析	14
5.1 土質条件と設計法との関連	14
5.2 矢板の剛度と設計法との関連	15
5.3 試設計による各設計法の構造諸元	16
6. あとがき	18

Statistical Data Analysis on Sheet Pile Quaywalls

Naoaki IWASAKI*

Takashi NAGAO**

Synopsis

Examples of port infrastructure, which have been designed to date, can be regarded as stock of experiences and technical knowledge in the past. Therefore, it is important for engineers to make full use of the informative stock.

We arranged and analysed 413 examples of sheet pile quaywalls which have been designed until 1990 from the following points of view.

- 1) Distribution of Element Dimensions
- 2) Relationship among Element Dimensions
- 3) Relationship between Element Dimensions and Design Conditions

We also analysed the conditions on which the elastic-beam method is often used by arranging the examples and comparing the results by the elastic-beam method with those by the equivalent-beam method.

We believe that findings in this paper are useful for engineers who attempt to design sheet pile quaywalls.

Key Words: Element Dimension of Port Infrastructure, Design Condition, Data Base, Sheet Pile Quaywalls, Equivalent-Beam Method, Elastic -Beam Method

* Ex-Member of Design Standard Laboratory, Planning and Design Standard Division

** Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division

矢板式係船岸の構造諸元などに関する統計的分析

岩崎 直晃*
長尾 毅**

要 旨

今日までに行われてきた港湾構造物の設計事例には、設計に関する経験と技術的な知見が集積されている。これらのデータの整理・分析を行うことにより、今後の設計に対して有益な技術情報を得ることができる。

本資料は、このような観点から、矢板式係船岸について、過去の設計事例を整理・分析したものである。まず、全国において平成四年度までに設計された係留施設1590例の設計条件などのデータを分析することにより、矢板式係船岸が採用されることが多い設計条件を明らかにした。また、平成三年度までに設計された矢板式係船岸の事例413例の設計条件、構造諸元などのデータを以下のような観点で、分析・整理することにより、矢板式係船岸の構造などに関する特性をまとめた。

- 構造諸元量などの分布
- 構造諸元間の関連
- 構造諸元と設計条件などの関連

さらに、矢板式係船岸の設計法のうち、たわみ曲線法が適用されることの多い土質条件などについて、設計事例の分析や軟弱地盤をモデルにした試設計による検討を行った。

ここで得られた分析結果は、矢板式係船岸の設計を行う際に設計者が配慮すべき事項についての参考資料となるほか、経験的な諸元決定、設計計算結果のチェックなどに活用することができる。

キーワード：港湾構造物諸元、設計条件、データ・ベース、矢板式係船岸、仮想ばり法、たわみ曲線法

1. まえがき

今日、主な港湾構造物の設計は電子計算機によって行われるのが通例であり、設計者が設計の個々のプロセスを逐次追うことは少なくなっている。このことは設計業務の効率化、簡素化に大きく寄与する一方で、計算機のアウトプットの妥当性に対する技術者としての感覚が従来よりも薄れがちなことが指摘されている。構造物の適切な設計を行うにあたっては、類似の条件下における過

去の設計例などから構造諸元のおおむねの値や設計法などを知っておくことが重要である。

港湾構造物のうち、ケーソン式混成堤、ケーソン式係船岸および直ぐい式横棧橋については、先の資料^{(1),(2),(3)}で構造諸元に関する分析を行い、その構造特性についてとりまとめている。今回は、平成四年度までに設計された全国の係留施設1590例のデータを利用して、構造様式の経年変化を整理し、構造様式の設計条件による比較を行うことにより、矢板式係船岸の特徴について調べた。ま

* 前計画設計基準部 設計基準研究室

** 計画設計基準部 主任研究官

た、平成三年度までにデータの収集を行った全国の矢板式係船岸の設計事例413例の構造諸元などについて、構造諸元量の分布、構造諸元間の関連、構造諸元と設計条件の関連について整理し、主として以下の2点の内容について詳細な分析を行い、矢板式係船岸の構造などに関する特性をまとめた。

○矢板式係船岸の設計を行ううえで、あらかじめ決定すべき事項（設計法、矢板壁の形状、控え工の形状、タイ材の種類など）を過去の設計事例により分析する。

○設計計算により得られる構造諸元のうち、設計の妥当性を確認する必要がある諸元の決定要因とその概略寸法について分析する。

さらに、矢板式係船岸の設計法のうち、たわみ曲線法が適用されることの多い土質条件などについて、設計事例の分析や軟弱地盤をモデルにした試設計による検討を行い、今後の設計に資するための資料を作成した。

なお、ここで取り扱う矢板式係船岸とは控え工を有する通常の鋼矢板壁のことであり、自立矢板式係船岸、斜め控えぐい矢板式係船岸、前方斜め支えぐい矢板壁を有する係船岸、二重矢板式係船岸などは対象外としている。

2. 矢板式係船岸の特徴

2.1 係留施設全体との比較

係留施設の構造様式別の比較については、先の資料³⁾で基礎となるデータが整理されている。全国において平成四年度までに設計された係留施設1590例の設計条件を構造様式別にまとめたもので、結果は図-1～4に示すとおりである。

構造様式の経年変化を示した図-1をみると、矢板式係船岸の設計は、昭和50年以降減少している。これは、近年、矢板式係船岸を設計する際に経済的に有利である掘込み港湾の整備が比較的減少していることが一つの要因であると考えられる。

図-2～4は、構造様式別の設計条件による比較を行

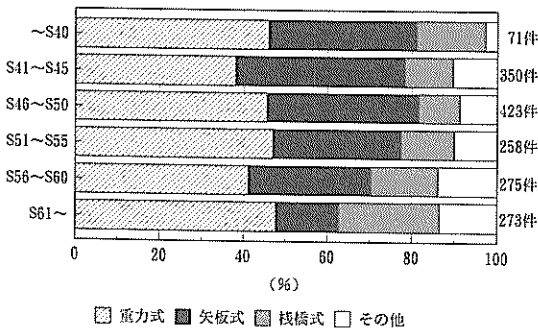


図-1 係留施設の構造様式の変化

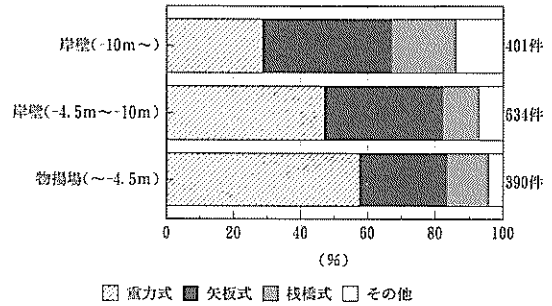


図-2 係留施設の構造様式 (計画水深別)

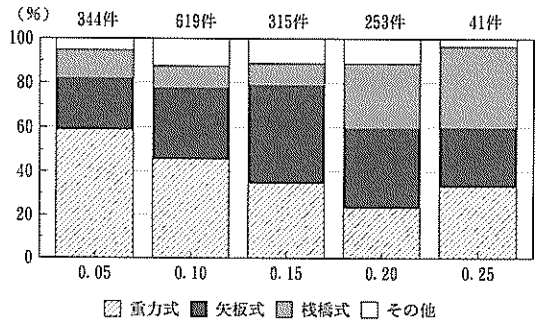


図-3 係留施設の構造様式 (設計震度別)

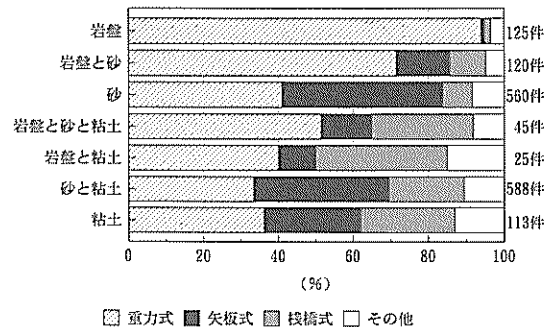


図-4 係留施設の構造様式 (土質条件別)

ったものである。いま、計画水深が深く、設計震度が大きく、地盤条件が良くない状態を「設計条件が厳しい」と定義すると、棧橋式係船岸は、設計条件の厳しい地点で設計されることが多く、また逆に重力式係船岸は、設計条件の厳しくない地点で設計されることが多いことがわかる。矢板式係船岸はその中間で、設計条件の厳しい地点で設計されることが比較的多いといえる。いずれにせよ、係留施設の構造様式の決定は、地盤改良の必要性まで含めた経済性や施工の容易さなどを総合的に勘案して行われるものであり、設計条件のみでその傾向を吟味することは限界がある。

2.2 矢板を用いた係留施設との比較

図-5～9は、平成四年度までに設計された矢板を用いた係留施設576例の設計条件を構造様式別に比較を行った図である。

各構造様式の割合を示した図-5をみると、タイロッド式係船岸（通常の矢板式係船岸）は、全体の約90%を占めており、他の形式は用いられている事例が非常に少ない。

構造様式別の経年変化を示した図-6をみると、タイロッド式係船岸の約60%が昭和50年以前に設計されており、年々減少傾向にあるが、他の構造様式よりも件数は多い。

構造様式別の比較としては、タイロッド式および柵式係船岸は、総じて設計条件の厳しい地点に、二重矢板式および自立矢板式係船岸は、設計条件の厳しくない地点に用いられている。タイロッド式係船岸は、矢板壁のみならず控え工の抵抗も期待する構造物であるため、大水深や軟弱地盤のもとでも比較的経済的な断面で成立するためである。

計画水深の違いによる構造様式別の特徴を示した図-7をみると、タイロッド式および柵式係船岸では、30～35%程度が-10m以上の水深で用いられており、-4.5m未満の地点で用いられている割合は15～20%程度でしかない。逆に、二重矢板式および自立矢板式係船岸では、70～90%程度が-4.5m未満の地点である。タイロッド式係船岸のうち、-4.5m未満における適用は、ほとんどが地盤条件のあまり良くない地点への適用である。

設計震度の違いによる構造様式別の特徴を示した図-8をみると、タイロッド式および柵式係船岸は、設計震度が0.20以上で用いられている事例が20%程度ある。二重矢板式および自立矢板式係船岸の75%程度は、設計震度が0.10以下の場合である。なお、自立矢板式係船岸については、設計震度が0.25の事例が一件だけあるが、これは背後地が狭く、土質条件が良い上にサンドコンパクションパイルで地盤改良を行い、剛度の大きい鋼管矢板を用いたケースであった。

土質条件の違いによる構造様式別の特徴を示した図-9をみると、タイロッド式および柵式係船岸では、岩盤を含む地盤への適用は25%程度であるが、二重矢板式および自立矢板式係船岸では、40～50%が岩盤を含む地盤へ適用されている。なお、土質条件については、例えば根入れ深さ程度までのN値および粘着力などについて、細かく吟味をすべきところであるが、取り扱っているデータの性質上困難であるためこのような整理とした。

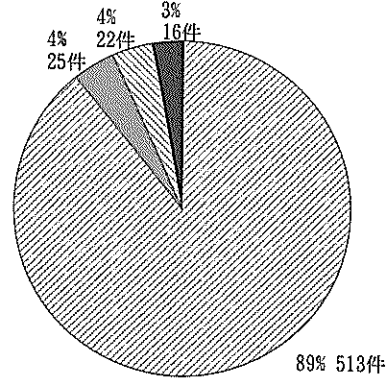


図-5 タイ材を用いた係留施設の構造様式の割合

図-5 タイ材を用いた係留施設の構造様式の割合

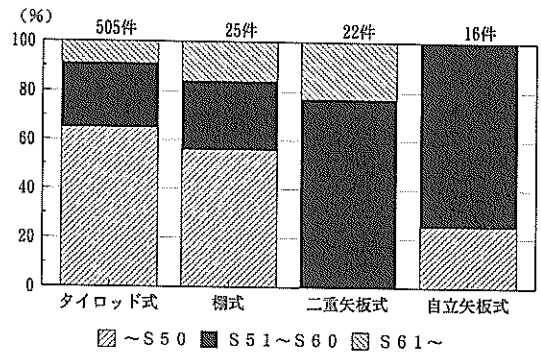


図-6 タイ材を用いた係留施設の構造様式の変化

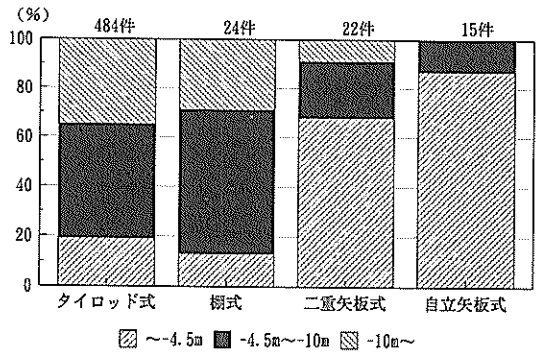


図-7 タイ材を用いた係留施設の構造様式（計画水深別）

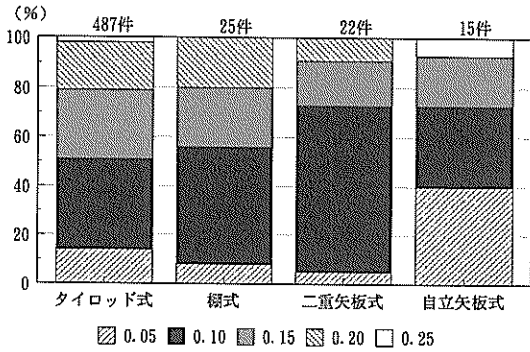


図-8 タイ材を用いた係留施設の構造様式 (設計震度別)

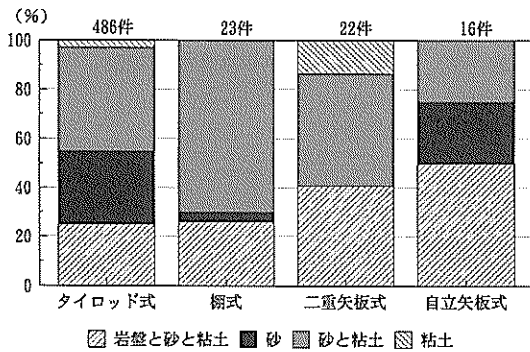


図-9 タイ材を用いた係留施設の構造様式 (土質条件別)

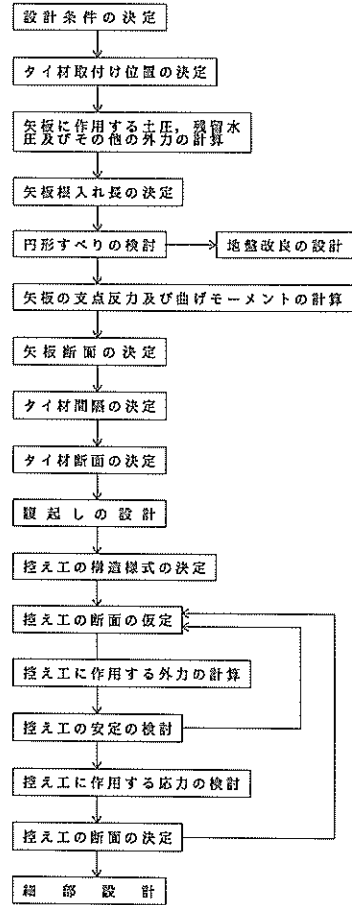


図-10 矢板式係船岸の設計手順

3. 矢板式係船岸の構造諸元などの決定過程

3.1 矢板式係船岸の設計手順

港湾構造物を設計するにあたっては、“港湾の施設の技術上の基準・同解説”⁴⁾(以下、“技術基準”と呼ぶ)をもとに設計するものとされている。

矢板式係船岸の設計の手順については、技術基準第8編“係留施設”で述べられている。また、実際の設計では、電子計算機を使用することが多く、運輸省の各港湾建設局においては、本研究所で技術基準をもとに開発された矢板式係船岸の基本設計プログラムが使用されている。

このプログラムを用いると、ほとんどの構造諸元を決定することができるため、設計者が技術的判断によって決定しなければならない項目はほとんどない。

しかしながら、具体的な構造物の設計においては、プログラムによる設計結果だけに頼るのではなく、構造物の設置される条件から、設計者があらかじめ構造物のおおまかな諸元をイメージ的に把握しておくことが重要である。

(1) 技術基準にみる設計手順

矢板式係船岸の設計は図-10に示すように行われ、大きく分類すると“設計条件の決定”、“外力の計算”、“矢板の設計”、“タイ材の設計”、“腹起しの設計”、“控え工の設計”、“細部設計”の順に進められる。

(2) 矢板式係船岸の基本設計プログラムにおける設計手順

矢板式係船岸の基本設計プログラムは、前項の手順のうち、“控え工の設計”までの部分について、与えられた条件下で鋼材使用料を最小にするような断面および根入長を求めるプログラムである。

プログラム計算を行う際に、設計者があらかじめ設定する必要のある諸元は以下の通りである。

“各種の土質条件”

“係船岸の形状”

“矢板壁本体・腹起し材・タイ材・控え鋼ぐいの許容応力度”

“矢板壁の設計手法”

このうち、“各種の土質条件”および“係船岸の形状”は、構造物が建設される地点の条件から自ずと定まる諸元であり、設計者が判断に迷う余地のないものである。しかし、“矢板壁本体・腹起し材・タイ材・控え鋼ぐいの許容応力度”および“矢板壁の設計手法”については、現地の状況から自動的に設定することは困難である。“矢板壁本体・腹起し材・タイ材・控え鋼ぐいの許容応力度”に関しては、設計者がプログラム計算を行う前に、適当な鋼材やタイ材を仮定することになる。この仮定が設計計算の結果過小であったり過大であったりすれば、鋼材やタイ材の種類を設定し直して再計算を行うことになる。これらについて適切な仮定をすることができない場合は、設計計算を何度も繰り返して行わねばならず、労力のロスに結びつく。したがって、設計者はプログラム計算を行うにあたって、現地の土質条件、計画水深などから定まる矢板壁や控え工の標準値を知っておくことが非常に重要となる。

“矢板壁の設計手法”は、次に述べるように仮想ばり法とたわみ曲線法が標準的であるが、どの設計法を用いるかは現地の土質条件や用いる矢板の剛度から、設計者があらかじめ決定する必要がある。採用する設計法によって設計結果はかなり異なる場合があるため、設計法の決定にあたっては高度な技術的判断が必要とされることがある。

3.2 矢板壁の設計方法

矢板壁の設計方法は大きく分るとフリーアースサポート法とフィクストアースサポート法がある。各設計法の違いは本稿で分析する内容と関連があるため、以下に簡単に述べる。

①フリーアースサポート法

フリーアースサポート法は、矢板の根入れ部下端において曲げモーメントがゼロとなると仮定して解く方法である。したがって、矢板壁は主働土圧と受

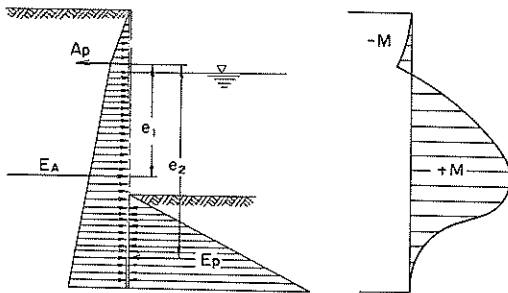


図-11 フリーアースサポート法

働土圧とタイ材の張力で支えられた単純ばりに近い状態と仮定し曲げモーメントを求める方法である。矢板壁に作用する土圧および曲げモーメントは、図-11のようになる。根入長はタイ材の取付点に対する主働土圧および受働土圧によるモーメントの釣合より求める。タイ材の張力は主働土圧と受働土圧の差となる。

②フィクストアースサポート法

フィクストアースサポート法は、矢板根入れ部のある深さ以下で矢板が地盤中に固定されていると仮定して解く方法である。したがって、海底面下、ある深さの所に矢板のたわみ曲線の反曲点があり、反曲点と矢板下端の間には負の曲げモーメントが作用するものと仮定する。また、矢板下端には負の方向の受働土圧を考慮するが、これは集中力と仮定されるのが普通である。矢板に作用する土圧および曲げモーメントは、図-12のようになる。

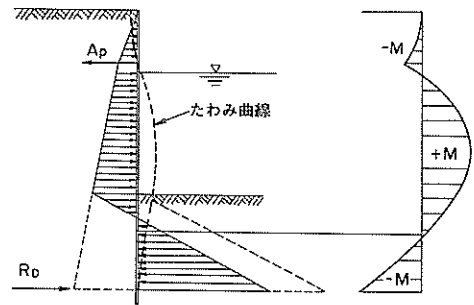


図-12 フィクストアースサポート法

フィクストアースサポート法に属する代表的なものには、仮想ばり法とたわみ曲線法がある。

仮想ばり法は、タイ材の取付点と海底面を支点とし、海底面より上の土圧および残留水圧が荷重として作用する単純ばりと仮想して解く方法である。

たわみ曲線法は、通常、図解法によって試行で解かれる。その方法は根入れ長を仮定し、根入れ下端が固定されているものとしてたわみ曲線を描き、タイ材の取付点のたわみがゼロとなるまで根入れ長を変えてこの作業を繰り返すものである。曲げモーメント、タイ材の張力は同時に図解法で求める。

一般的には、砂質土や硬い粘性土地盤の場合は、根入長はフリーアースサポート法により、矢板の曲げモーメントおよびタイ材の張力はタイ材の取付点と海底面を支点とする仮想ばり法により解析することを基本としている。しかし、軟弱な粘性土地盤や非常にゆるい砂質土地

盤の場合、および剛度の大きい矢板を用いる場合には、矢板の曲げモーメントがゼロとなる位置が海底面より下がり、この方法での解析は危険側となるので、この場合には地盤改良を行うか、あるいはたわみ曲線法により解析することとしている。

前述のように、設計法の違いによって計算結果には多少の差が生じるので、どの程度の条件でたわみ曲線法が用いられることが多いかを知っておくことは極めて重要である。

4. 設計事例による構造諸元の分析

以下では、構造諸元と設計条件などの関係を分析していくが、各構造諸元は単一の設計条件によって規定されるのではなく、複数の設計条件が複雑に影響しあって決定される。解析手法を高度化する観点からは、例えば実験計画法に基づく分散分析手法などを用いることも考えられるが、矢板式係船岸の構造諸元は既に述べたようにほとんどがプログラムを用いて容易に決定できるため、複雑な解析手法を適用することはふさわしくない。したがって、本稿においては、構造諸元と設計条件の一对一の相関関係を整理し、分析することとした。設計条件には、構造諸元に与える影響が大きい条件を検討した結果、計画水深と設計震度の影響が大きいことがわかったため、おもにこの2つの条件を用いた。なお、土質条件については、構造諸元に与える影響は大きいと考えられるものの、前述のようにデータに制約があるため、詳細な分析を行うことは困難であった。用いたデータは、平成三年度までに設計された矢板を用いた係留施設413例の設計条件である。

4.1 矢板壁に関する構造諸元

図-13~25は、矢板壁に関する構造諸元について示したものである。

矢板壁の形状と計画水深の関係を示した図-13をみると、計画水深が-4.5m未満の場合はU型鋼矢板が90%程度と多いが、-10m以上の場合では鋼管矢板が50%程度使用されている。Z型鋼矢板については、U型鋼矢板に比べて断面係数が大きいため、U型鋼矢板と鋼管矢板の中間的な用いられ方である。-4.5m未満で鋼管矢板が1件使用されているが、これはかなり水深の深いところまで粘性土地盤になっている地点への適用である。置換で地盤改良を行っているが、根入深度が-22mと計画水深が浅いわりには大型な係船岸になっている。

矢板壁の形状と設計震度の関係を示した図-14をみると、設計震度が0.15以下の場合にはU型鋼矢板が60%程度と多いが、0.20以上の場合には鋼管矢板が60%程度使用さ

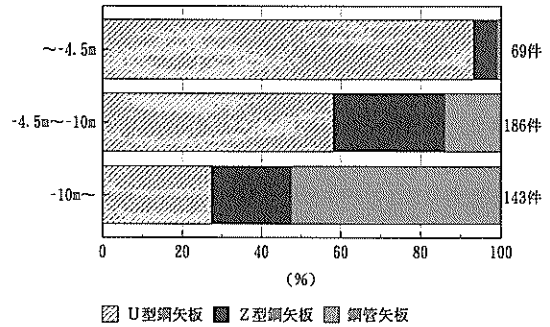


図-13 矢板壁の形状と計画水深の関係

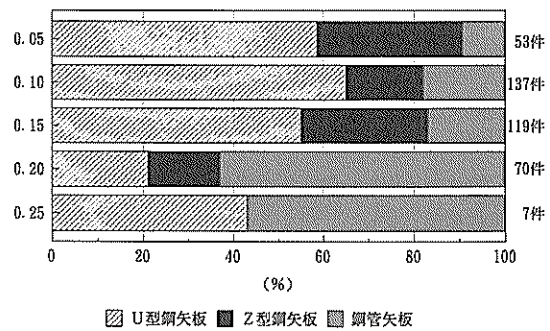


図-14 矢板壁の形状と設計震度の関係

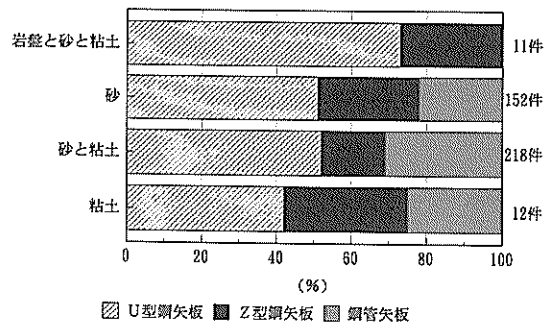


図-15 矢板壁の形状と土質条件の関係

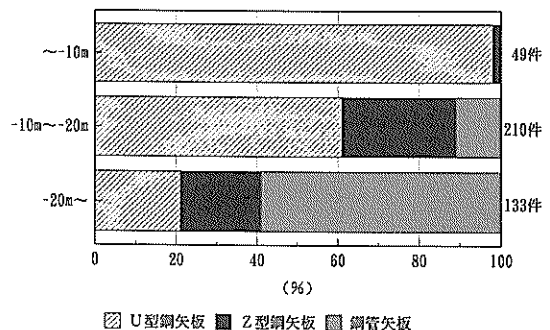


図-16 矢板壁の形状と矢板壁の根入深度の関係

れている。設計震度0.25でU型鋼矢板が用いられている割合は0.20の場合よりも多くなっているが、データ件数が0.25の場合7件と少なく、単純には比較できない。データをみると、それらはいずれも計画水深が浅く地盤条件も良い場合である。

矢板壁の形状と土質条件の関係を示した図-15をみると、岩盤を含む地盤への適用は11件とデータ件数が少ないが、U型鋼矢板が70%程度、Z型鋼矢板が30%程度使用され、鋼管矢板については使用されていない。その他の土質条件については、データ件数が少ない粘性土地盤を含めて、使用されている矢板壁の種類にはあまり違いがなく、U型鋼矢板が40~50%程度、Z型鋼矢板が20~30%程度、鋼管矢板が20~30%程度使用されている。

矢板壁の形状と矢板壁の根入深度の関係を示した図-16をみると、図-13の矢板壁の形状と計画水深の関係と同様の関係になり、根入深度が-10mより浅い場合にはU型鋼矢板が98%、-20m以上と深い場合には鋼管矢板が60%程度使用されている。Z型についても図-13と同様で、U型鋼矢板と鋼管矢板の中間的な用いられ方であるといえる。

鋼矢板壁のうち、U型鋼矢板とZ型鋼矢板について、矢板壁の形状とタイ材取付間隔の関係を示したものが図-17である。技術基準によれば、U型およびZ型鋼矢板は矢板4枚ごとにタイ材を取付ける例が多いとされており、実際ほとんどがそのようになっている。U型鋼矢板について3枚ごとに取付けている例は、地盤条件も良く、タイ材についても標準的なものを使用しており、3枚ごとに取付けた理由は不明である。Z型鋼矢板について5枚ごとに取付けている例は、設計震度も小さく、土質条件も良い事例である。

鋼管矢板のタイ材の取付間隔については、技術基準には特に規定がない。ここでは、矢板壁に使用される鋼管矢板の径とタイ材取付間隔の関係を図-18に示した。鋼

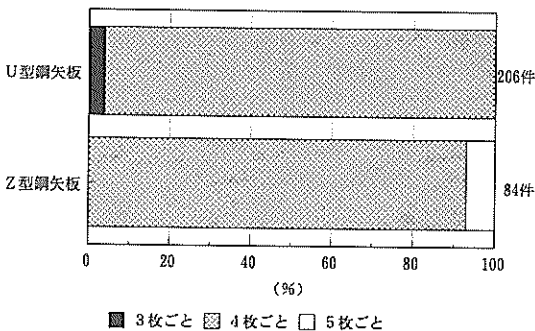


図-17 鋼矢板壁の形状とタイ材取付間隔の関係

管矢板の径が900mm未満では2本ごとに取付けている例が95%程度と多く、径が900mm以上1200mm未満、1200mm以上と大きくなるにつれて1本ごとに取付ける例が20%程度ずつ多くなっている。このことは、設計条件が厳しくなるにしたがって取付間隔を狭くする例が増加することを意味している。逆に径が1200mm以上で3本ごとに取付けられている例は5件あるが、これらは同じ地区での設計で、タイ材の直径が太いものを使用し、層の厚い粘土地盤を全面的に置換えることにより砂地盤にしているものである。

矢板壁に生じる曲げモーメント（常時）と計画水深の関係を示したのが図-19である。かなりのばらつきはあるが、計画水深と曲げモーメントの関係は指数関数的である。データをもとにして回帰曲線をあてはめ、代表的な計画水深における曲げモーメントを求めると、計画水深が-4.5mでは17tfm/m、-7.5mでは38tfm/m、-10mでは75tfm/mとなる。

矢板壁に生じる曲げモーメント（地震時）については、設計震度との関係を図-20に示した。各設計震度によってデータ件数にばらつきがあるが、設計震度が0.1以上で

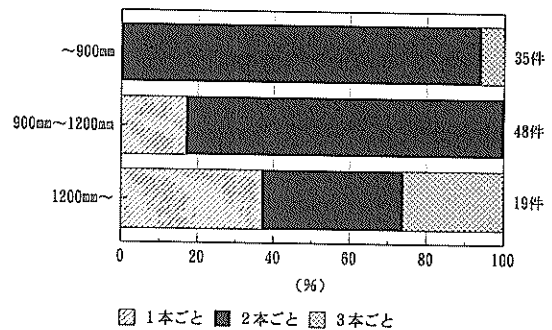


図-18 鋼管矢板の径とタイ材取付間隔の関係

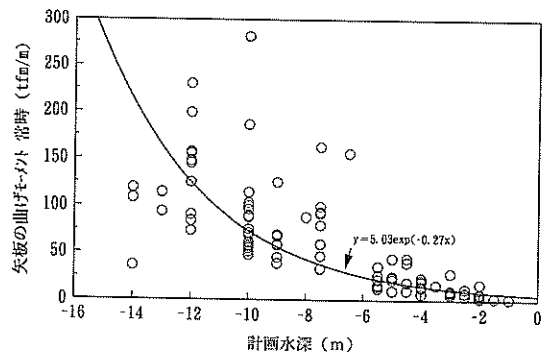


図-19 矢板壁に生じる曲げモーメント（常時）と計画水深の関係

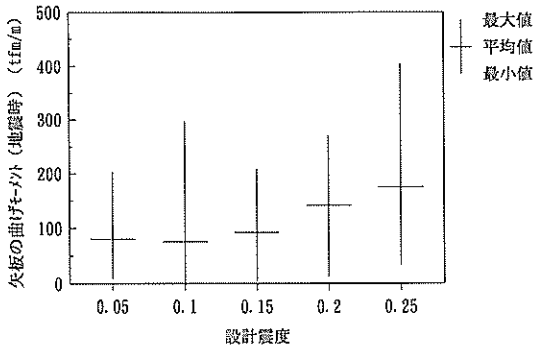


図-20 矢板壁に生じる曲げモーメント(地震時)と設計震度の関係

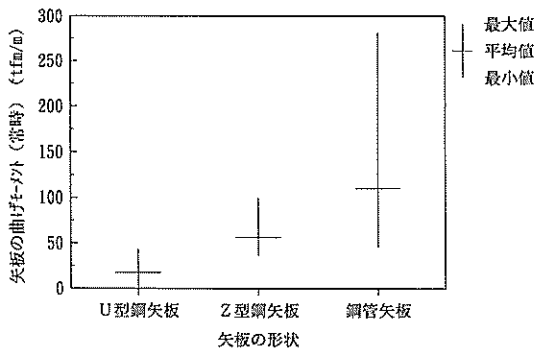


図-21 矢板壁の形状と矢板に生じる曲げモーメント(常時)の関係

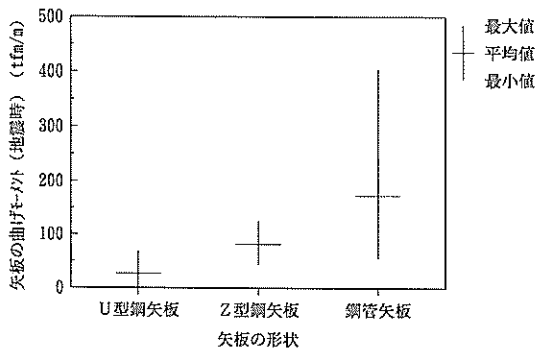


図-22 矢板壁の形状と矢板に生じる曲げモーメント(地震時)の関係

は矢板に生じる曲げモーメント(地震時)の平均値は設計震度が大きくなるにつれて約20%ずつ大きくなる。

矢板壁の形状と矢板に生じる曲げモーメント(常時および地震時)の関係を示した図-21および図-22をみると、鋼管矢板を使用している事例は、矢板に生じる曲げモーメントの範囲が他と比較して広いのが特徴である。矢板に生じる曲げモーメントが大きくなるほどU型鋼矢板、Z型鋼矢板、鋼管矢板の順に断面係数の大きな矢板が用いられている。

矢板の根入深度と計画水深の関係を示した図-23をみると、かなりのばらつきはあるが、計画水深と矢板の根入深度の関係は比例的である。データをもとにして回帰曲線をあてはめ、代表的な計画水深における矢板の根入深度を求めると、計画水深が-4.5mでは-13m、-7.5mでは-17.2m、-10mでは-20.8mとなる。

ただし、図-19および図-23は上載荷重、天端高、潮位などがそれぞれ異なったデータを使用しているため、定性的傾向を表しているにすぎない。

矢板の根入深度と設計震度の関係を示した図-24をみると、データ件数が7件と少ない設計震度0.25を除くと、設計震度が大きくなるにつれて矢板の根入深度の平均値は5~25%深くなる傾向にある。

防食方法の経年変化を示した図-25をみると、流電陽極の割合が年代にかかわらず40~50%を占めている。電気防食工法においては、高性能の陽極材の開発にともなって昭和40年頃からメンテナンスの容易な流電陽極方式が主流となっている。ただし、昭和61年以降では、外部電源方式や塗覆装工法の採用もみられる。外部電源方式は、環境に応じて構造物の電位を監視しながら防食電流

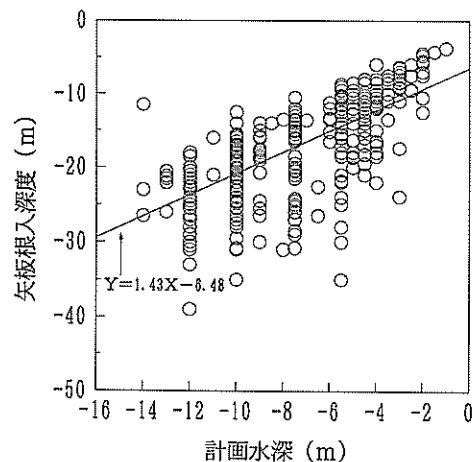


図-23 矢板の根入深度と計画水深の関係

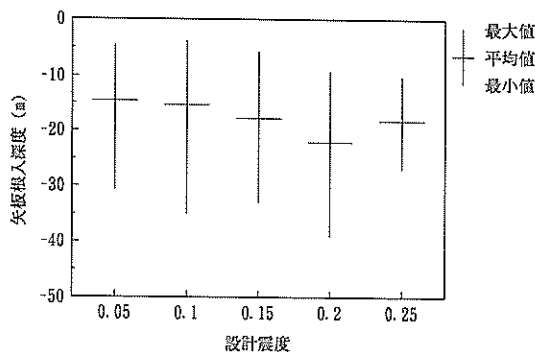


図-24 矢板の根入深度と設計震度の関係

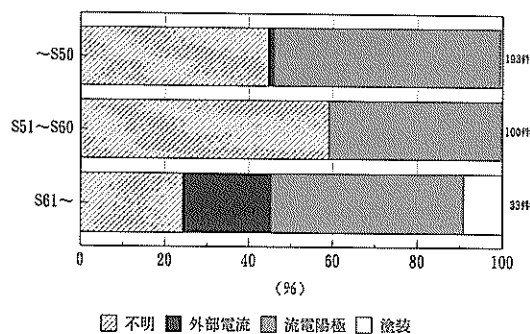


図-25 防食方法の経年変化

を調整することができるため、変化の激しい特殊な環境に対応できるが、保守管理の面では問題があるといわれている。また、塗覆装工法は、大型構造物や複雑な形状にも容易に施工でき、また、補修性にも優れている^{51,6)}。

4.2 タイ材に関する構造諸元

図-26～29は、タイ材に関する構造諸元について示したものである。

タイ材の種類別の割合を示した図-26をみると、SS鋼材や高張力鋼を含むタイロッドが90%程度を占めている。また、タイロッドの中でも高張力鋼45が使用されている割合が高く、全体の60%程度を占めている。タイワイヤーについては、48件あるがそのうち80%はPC鋼線が使用されている。

タイ材の使い分けについては、地盤条件との比較を行うべきところであるが、データの制約上無理があるので、ここではタイ材の種類と応力度（常時および地震時）の関係で整理を行った。その結果（図-27および図-28）をみると、タイワイヤーはタイ材の応力度が大きい場合に使用されていることから、設計条件の厳しい地点への適用が多いことがわかる。これは、タイワイヤーの許容張力がタイロッドよりも大きいためである。タイロッド

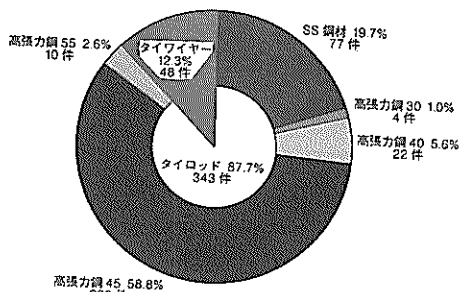


図-26 タイ材の種類別の割合

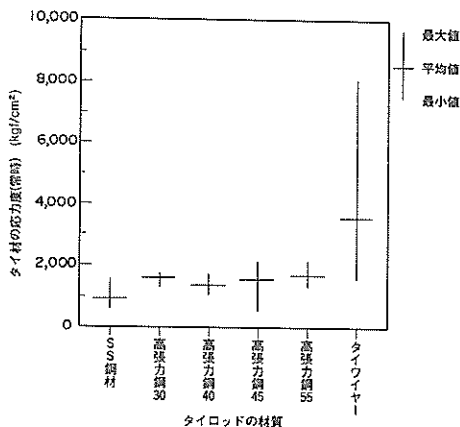


図-27 タイ材の種類と応力度（常時）の関係

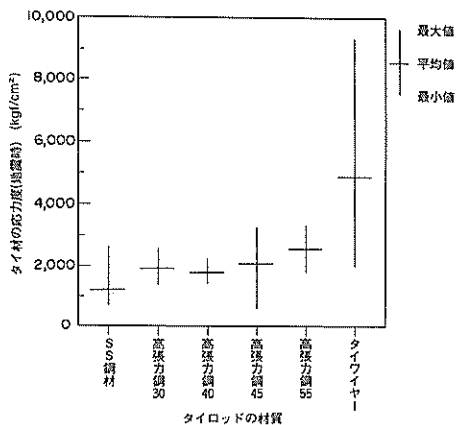


図-28 タイ材の種類と応力度（地震時）の関係

の中では、高張力鋼45を使用している事例の応力度の範囲が他と比較して広いのが特徴である。タイロッドの利用に占める高張力鋼45の割合が非常に高いことを考えると、タイロッドについては、必ずしも作用する応力だけでタイ材の種類を決定しているとはいえないようである。

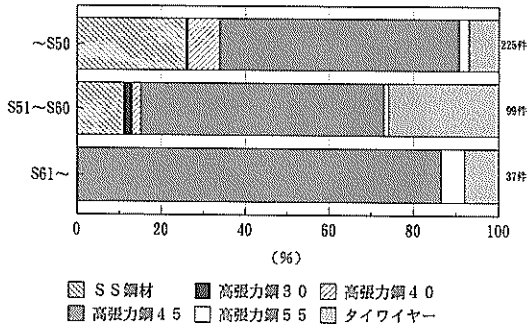


図-29 タイ材の種類の変遷

タイ材の種類の変遷を示した図-29をみると、SS鋼材は昭和50年までは30%程度、昭和51年から昭和60年までは10%程度使用されていたが、昭和61年以降は全く使用されていない。逆に高張力鋼45は昭和50年までは55%程度、昭和51年から昭和60年までは60%程度、昭和61年以降は85%と年々増加傾向にある。

4.3 控え工に関する構造諸元

図-30~37は、控え工に関する構造諸元について示したものである。

控え工の種類の変遷を示した図-30をみると、年々控え直杭式が使用される事例が増加し、逆に控え矢板式を使用する事例が減少している。近年、係船岸の大型化にともない、計画水深の深さも深くなる傾向にあるため、施工前の海底面が深い場合に有利な控え直杭式および控え組杭式が採用される事例が増加していると考えられる。

控え工の種類の変遷を示した図-31をみると、各港湾建設局によって件数がかなり違うが、控え直杭式および控え矢板式が、それぞれ40~60%程度使用されている。一建では控え直杭式が80%程度使用されている。二建では控え組杭式が70%程度使用されている。この形式は変位が他と比べて少ないので、地震には有利である。なお、港湾建設局の正式名称と管轄は表-1のとおりである。

次に、控え工の種類と設計条件の関係を検討していくが、設計条件が良くない場合には控え組杭式が使用され、控え直杭式および控え矢板式は控え組杭式よりも設計条件が良い場合に使用されることが多い。

控え工の種類と計画水深の関係を示した図-32をみると、控え矢板は計画水深が-10m未満では40%程度使用されているが、-10m以上では20%程度しか使用されていない。逆に、控え組杭は計画水深が-4.5m未満では1%程度、-4.5m以上-10m未満では20%程度、-10m以

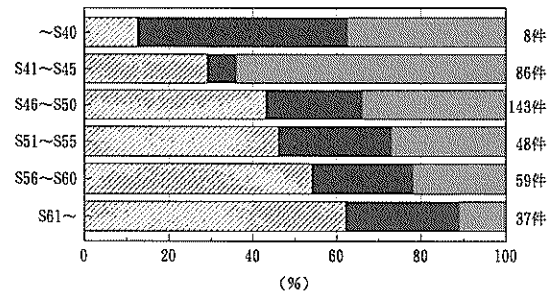


図-30 控え工の種類の変遷

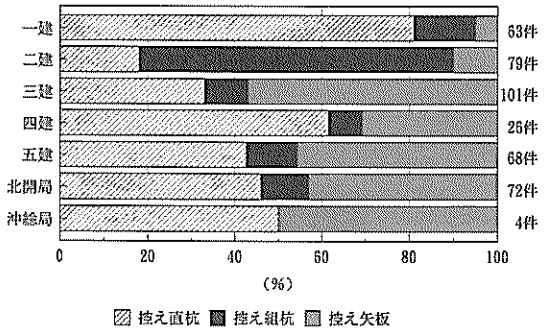
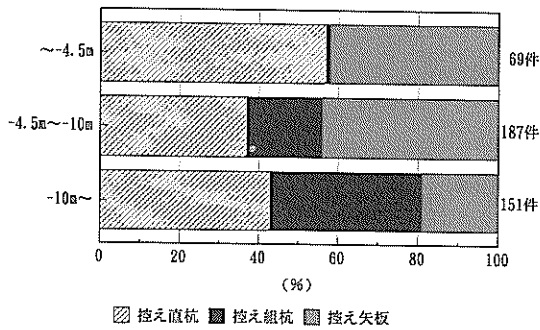


図-31 控え工の種類の変遷

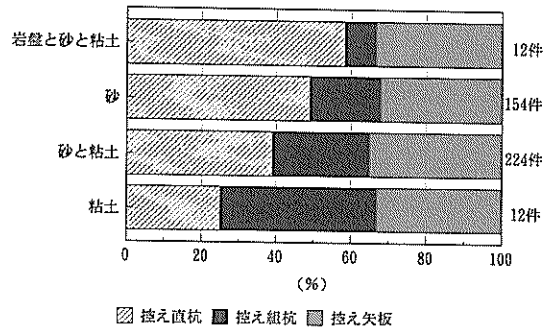
表-1 港湾建設局の正式名称と管轄

略称	正式名称	管轄
一建	第一港湾建設局	秋田県、山形県、新潟県、富山県、石川県、福井県、長野県
二建	第二港湾建設局	青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、山梨県
三建	第三港湾建設局	滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県、鳥取県、島根県、岡山県、広島県、徳島県、香川県、愛媛県、高知県
四建	第四港湾建設局	山口県、福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県、大分県、宮崎県、鹿児島県
五建	第五港湾建設局	岐阜県、静岡県、愛知県、三重県
北開局	北海道開発局	北海道
沖総局	沖縄総合事務局	沖縄県

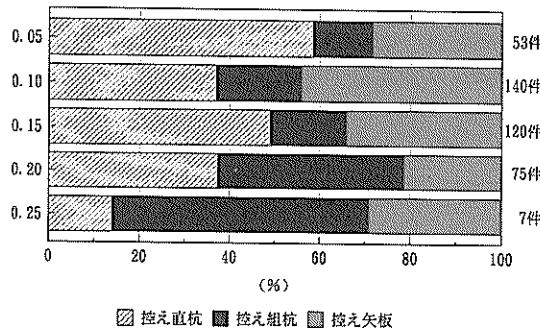
上では40%程度使用されている。控え直杭は計画水深による変動は小さく、いずれの場合も40~60%程度使用されている。



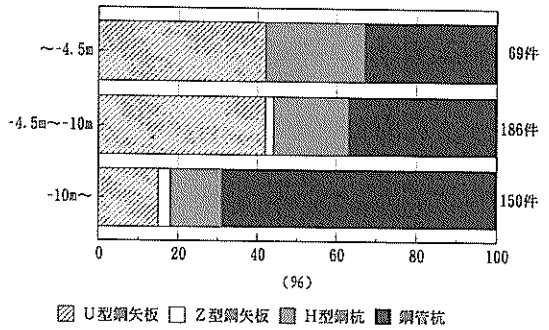
図一32 控え工の種類と計画水深の関係



図一34 控え工の種類と土質条件の関係



図一33 控え工の種類と設計震度の関係



図一35 控え工の形状と計画水深の関係

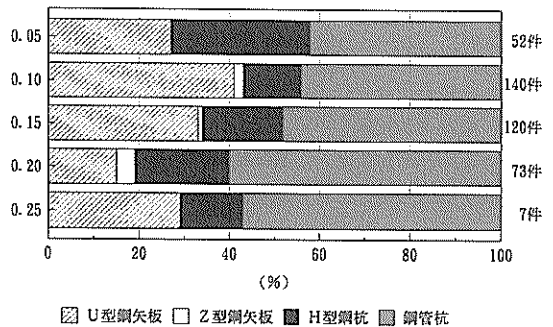
控え工の種類と設計震度との関係を示した図一33をみると、控え組杭は設計震度が0.20以上では40~60%程度使用されているが、0.15以下では10~20%程度しか使用されていない。逆に、控え直杭は設計震度が0.20以下では40~60%程度使用されているが、0.25では15%程度しか使用されていない。控え矢板は設計震度にかかわらず30~40%程度使用されている。

控え工の種類と土質条件との関係を示した図一34をみると、控え直杭式が土質条件の良い岩盤を含む地盤から土質条件の悪い粘性土地盤になるにつれて10~15%程度の割合で減少し、逆に、控え組杭式が10~15%程度の割合で増加している。控え矢板式は土質条件にかかわらず35%程度使用されている。

次に、控え工の形状について分析する。

控え工の形状と計画水深との関係を示した図一35をみると、計画水深が-10m未満ではU型鋼矢板の使用が40%程度と最も多く、-10m以上では鋼管杭が70%程度と最も多くなる。H型鋼杭は計画水深にかかわらず15~25%程度使用されている。Z型鋼矢板は控え工ではほとんど使用されていない。

控え工の形状と設計震度との関係を示した図一36をみる



図一36 控え工の形状と設計震度との関係

と、鋼管杭は、設計震度が0.15以下では40~50%程度使用されているが、0.20以上になると、データ件数が7件と少ない設計震度0.25を含めて、60%程度と使用される割合が増加している。U型鋼矢板は、設計震度が0.15以下では30~40%程度使用されているが、0.20になると15%程度と使用される割合が減少している。設計震度が0.25の場合は使用される割合が再び増加しているが、データをみると計画水深が浅く地盤条件も良い地点への適用である。H型鋼杭は、断面係数がU型鋼矢板よりも大

きく鋼管杭よりも小さいことから両者の中間的な用いられたかたである。

控え工の形状と矢板壁の根入深度の関係を示した図-37をみると、図-35の控え工の形状と計画水深の関係と同様の関係になり、根入深度が-10mより浅い場合にはU型鋼矢板が45%と最も多く、-20m以上と深い場合には鋼管矢板が70%程度と最も多く使用されている。H型钢杭は計画水深にかかわらず10~20%程度使用されている。

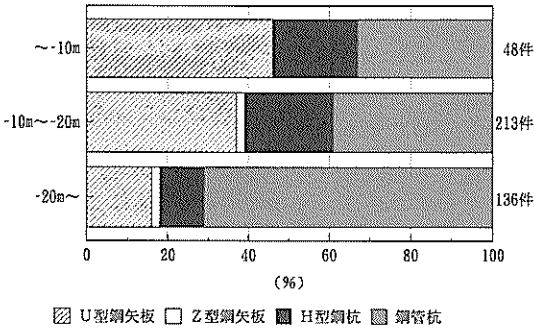


図-37 控え工の形状と矢板壁の根入深度の関係

5. 矢板壁の設計法の違いによる構造諸元の分析

3.2に述べたように、軟弱な粘性土地盤や非常にゆるい砂質土地盤の場合、および剛度の大きい矢板を用いる場合は、たわみ曲線法を用いて矢板壁を設計することとされている。しかしながら、具体的にどの程度の地盤条件や矢板を用いる場合にたわみ曲線法を適用すべきかという点については、明瞭な規定がない。そこで、本章では、既往の設計事例などからたわみ曲線法が適用されることの多い条件について検討を行った。

5.1 土質条件と設計法の関連

まず、平成三年度までに設計された矢板式係船岸の事例413例のデータを利用して土質条件と設計法の分析を行った。図-38は、砂質土地盤において、 N 値と矢板壁の設計法の関係を示した図である。ここでの N 値とは、当研究室が所有しているデータベースにおいて「土層第一層」として登録されている値の平均値である。この土層第一層の範囲には明確な規定はなく、海底面下何mまでの値が登録されているかはデータの登録者、登録機関によってまちまちなのが現状である。このため確定的なことはいえないが、たわみ曲線法は、比較的ゆるい地盤といえる N 値が10未満の地点で使用されている割合が75%と最も高い。一方、仮想ばり法については、 N 値が

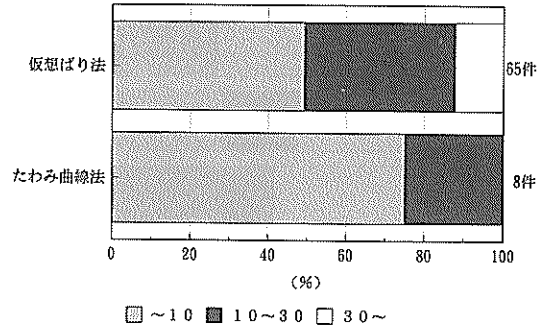


図-38 N 値と矢板壁の設計法の関係

10未満の場合は50%程度である。ただし、ここで用いているたわみ曲線法のデータ件数は8件と少なく、 N 値のデータについてもこれ以上の分析を行うことは難しい。

そこで次に、各港湾建設局においてたわみ曲線法で設計されている事例を収集し、土質条件を詳細に再整理することとした。また、たわみ曲線法と仮想ばり法の適用の境界を探る観点から、たわみ曲線法の設計例を収集した港湾内で仮想ばり法によって設計されている事例についてもあわせてデータを整理した。その結果が図-39であり、裏込め下端から矢板根入深度までの間の N 値の平均値と各設計法によって設計された施設数の関係を示している。もとにしたデータのうち、 N 値ではなく ϕ の値が

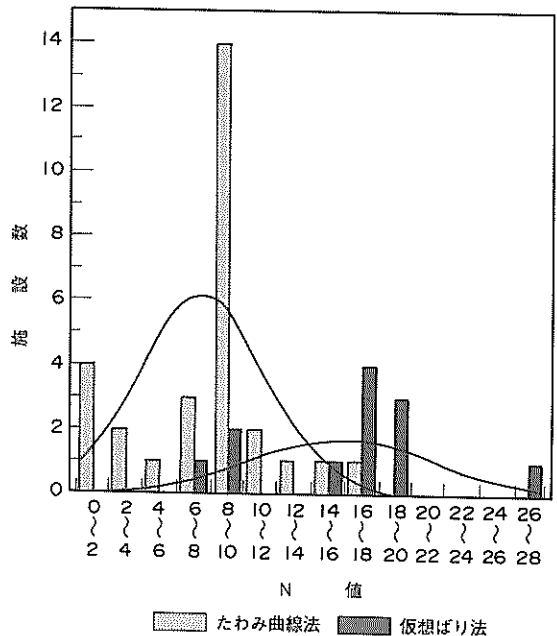


図-39 N 値の平均値と各設計法によって設計された施設数の関係

使用されていたものについては、換算式 $\phi = \sqrt{12N} + 20$ を用いて N 値に換算した。これを見ると、たわみ曲線法は N 値が10未満で設計されている割合が83%で、特に、 N 値が8~10の範囲で件数が14件と飛び抜けて多くなっている。また、このグラフに正規分布をあてはめると、平均値は7.5、分散は14.0となる。仮想ばり法については、 N 値が10以上が64%で、正規分布をあてはめると、平均値は15.9、分散は29.6となる。 N 値が10よりも小さい地点で仮想ばり法で設計している例もあるが、これは計画水深が浅い物揚場の場合である。以上により、既往の設計事例においてはたわみ曲線法の適用境界は砂質土地盤の場合、 N 値=10程度が一つの目安になるといえる。上の換算式を用いてこれを ϕ に換算すると $\phi = 30'$ になる。

次に、粘性土地盤について同様な整理を行った。その結果が図-40であり、裏込め下端から矢板根入深度までの間の粘着力 C の平均値と各設計法によって設計された施設数の関係を示している。これを見ると、たわみ曲線法は 5tf/m^2 未満で設計されている割合が67%で、特に、粘着力 C の平均が2~ 6tf/m^2 で件数が多くなっている。また、このグラフに正規分布をあてはめると、平均値は5.2、分散は5.7となる。仮想ばり法については、データが2件しかないためここでは明確なことはいえない。以上により、既往の設計事例においてはたわみ曲線法の適

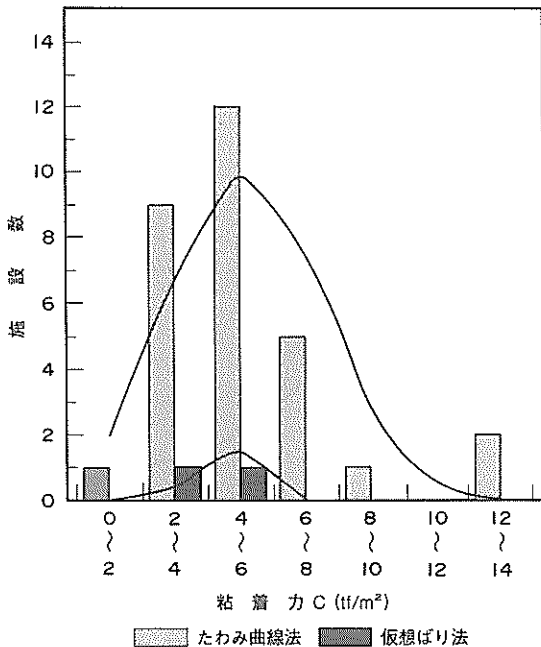


図-40 粘着力 C の平均値と各設計法によって設計された施設数の関係

用境界は粘性土地盤の場合、粘着力 $C = 5\text{tf/m}^2$ 程度が一つの目安になるといえる。

5.2 矢板の剛度と設計法の関連

図-41および図-42は、データとして再び平成三年度までに設計された矢板式係船岸の事例413例を用いて分析を行ったものである。

技術基準においては、鋼管矢板のように剛度が大きい矢板を使用する場合にはたわみ曲線法を使用することとしている。

矢板壁の形状と矢板壁の設計法の関係を示した図-41を見ると、たわみ曲線法の設計例13件に占める鋼管矢板の割合は46%となっており、仮想ばり法におけるその36%と比べて大差ない結果となっている。したがって、実際の設計例では剛度の高い矢板を用いた場合にたわみ曲線法を採用したような傾向は顕著ではない。

そこで次に、鋼管矢板を用いた事例に着目して、矢板の剛度 EI と矢板壁の設計法の関係を図-42に示した。現在使用されている鋼管矢板の剛度は $4.0 \times 10^4 \text{tfm}^2/\text{m}$

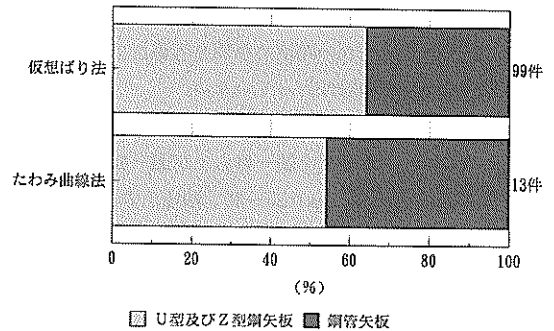


図-41 矢板壁の形状と矢板壁の設計法の関係

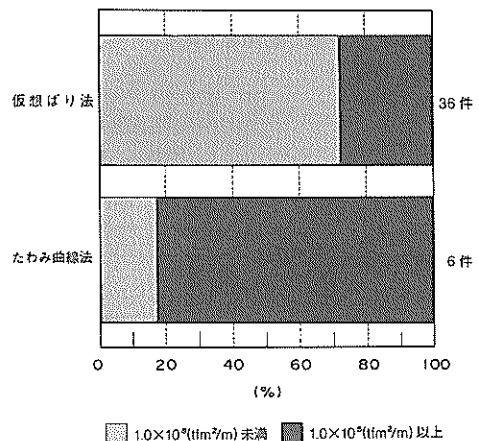


図-42 矢板の剛度 EI と矢板壁の設計法の関係

~ $2.5 \times 10^6 \text{tfm}^2/\text{m}$ であり、剛度の平均値は、 $1.0 \times 10^6 \text{tfm}^2/\text{m}$ 程度であると考えられる。この図をみると、たわみ曲線法では、 $1.0 \times 10^6 \text{tfm}^2/\text{m}$ 以上の剛度の矢板を用いて設計を行っている例が80%程度を占めており、仮想ばり法では30%程度となっている。したがって鋼管矢板については、たわみ曲線法は剛度の高い矢板を用いた事例が多く、その目安として $1.0 \times 10^6 \text{tfm}^2/\text{m}$ 程度をあげることができる。

5.3 試設計による各設計法の構造諸元

前節において、たわみ曲線法が用いられることの多い条件を明らかにしたが、軟弱地盤に各設計法を適用した場合、結果にどの程度の差がでるのかを知っておくことは重要である。

そこでまず、図-43に示す設計条件のもとで、地盤の強度を示すパラメータを砂質土地盤の場合 $\phi=25\sim40^\circ$ 、粘性土地盤の場合 $C_0=3\sim7 \text{tf}/\text{m}^2$ と変化させて仮想ばり法とたわみ曲線法による試設計を行った。設計震度は図-8から矢板式係船岸の適用例が最も多い0.10とした。計画水深は大水深における適用を想定して-10mとし、その他の条件は一般的な矢板式係船岸の諸元を用いた。なお、各設計法は矢板の剛度の影響を考慮していないため、剛度に関する検討は行っていない。

矢板の必要根入長について砂質土地盤における結果と粘性土地盤における結果を図-44および図-45に示す。これを見ると、砂質土で $\phi=25\sim40^\circ$ 、粘性土で $C_0=3\sim7 \text{tf}/\text{m}^2$ 程度の地盤ではいずれもたわみ曲線法の方が仮想ばり法によるよりも矢板の必要根入長が2~5m程度長くなる傾向にあり、グラフの形状は似通ったものとなる。したがって、この程度軟弱な地盤では、地盤が軟弱であるほど両設計法の結果の差の割合は少なくなるといえる。また、5.1で述べた仮想ばり法とたわみ曲線法の適用境界の目安である $\phi=30^\circ$ 、 $C_0=5 \text{tf}/\text{m}^2$ では、15~30%程度、たわみ曲線法の方が長い結果を与える。

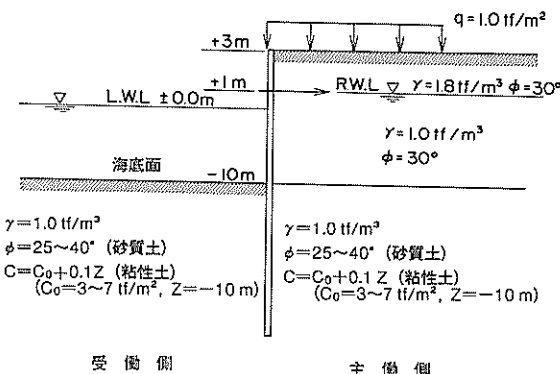


図-43 試設計に用いた設計条件

矢板に生じる最大曲げモーメントについて、砂質土地盤における結果と粘性土地盤における結果を図-46および図-47に示す。矢板の必要根入長の場合とは異なり、矢板に働く最大曲げモーメントは地盤が軟弱であるほど仮想ばり法とたわみ曲線法の差が大きくなり、地盤が固くなるにつれてその差は急激に縮まる。仮想ばり法とたわみ

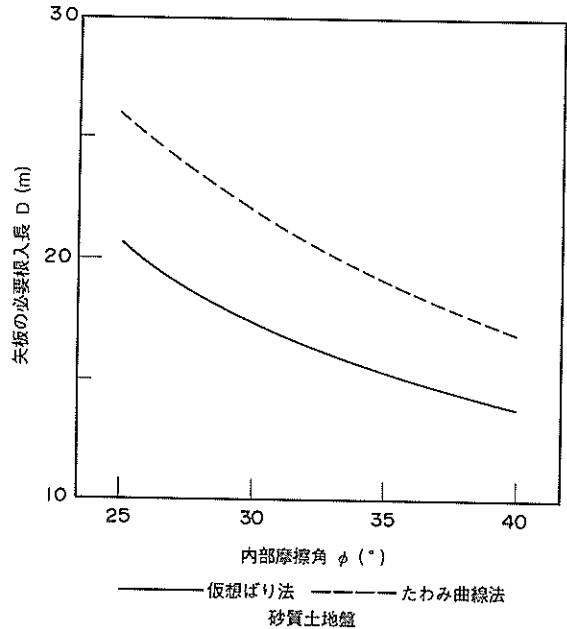


図-44 矢板の必要根入長と土の内部摩擦角 ϕ の関係

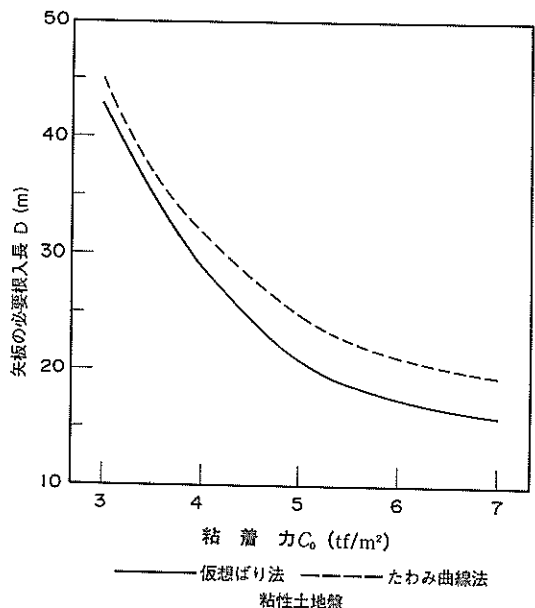
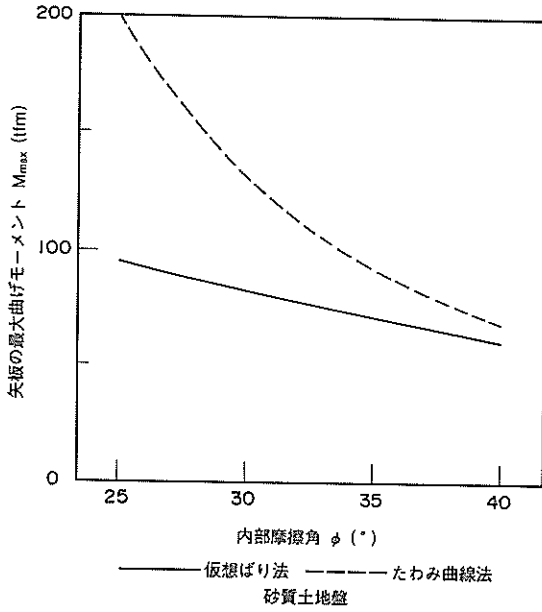
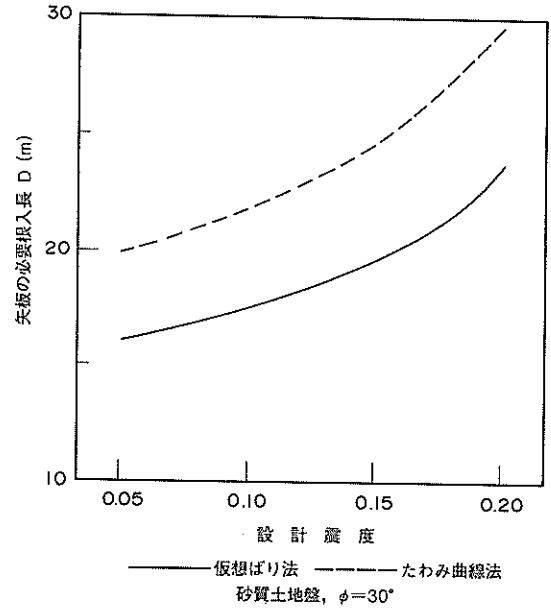


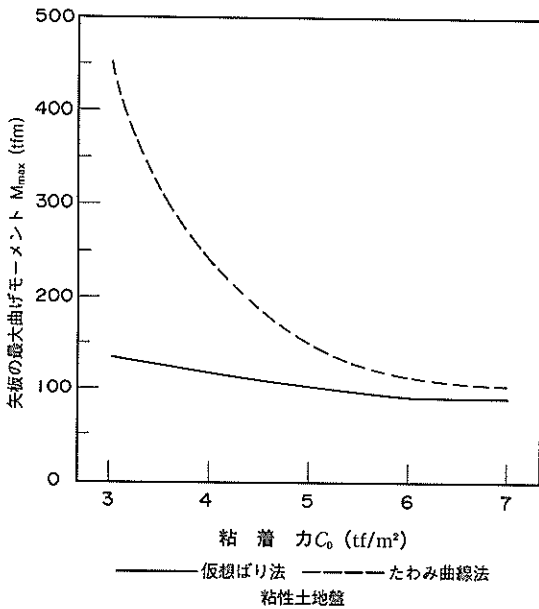
図-45 矢板の必要根入長と粘着力 C_0 の関係



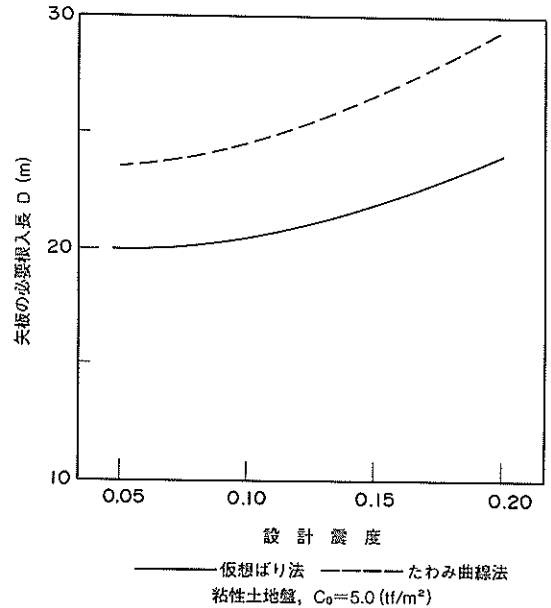
図—46 矢板に生じる最大曲げモーメントと土の内部摩擦角 ϕ の関係



図—48 矢板の必要根入れ長と設計震度の関係（砂質土地盤）



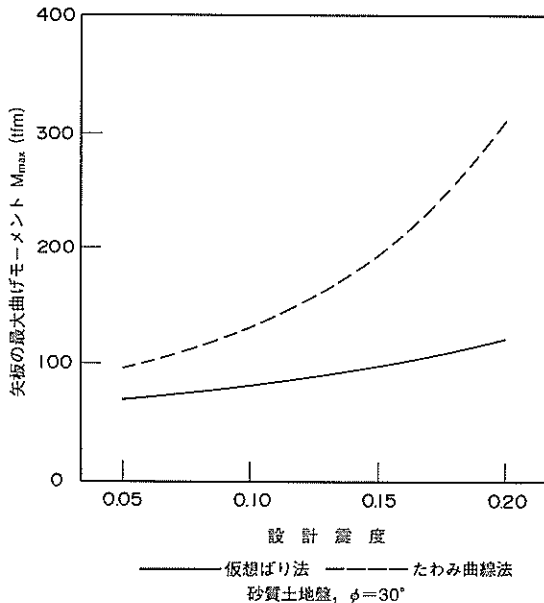
図—47 矢板に生じる最大曲げモーメントと粘着力 C_0 の関係



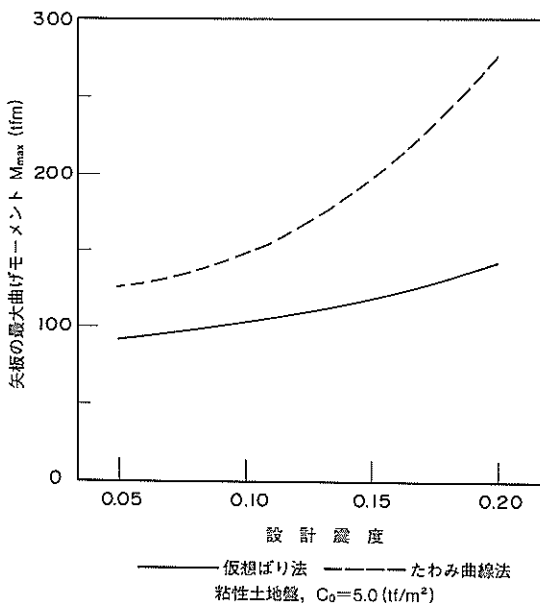
図—49 矢板の必要根入れ長と設計震度の関係（粘性土地盤）

曲線法の適用境界の目安である $\phi=30^\circ$ では60%、 $C_0=5$ tf/m²では45%程度の差があり、それより固い地盤、例えば $\phi=35^\circ$ 、 $C_0=6$ tf/m²程度では25~30%とその差は縮まる。假想ばり法については、強度の変化に伴う M_{max} の値の変化はたわみ曲線法による場合よりも少ない。これ

は、たわみ曲線法の設計は、矢板壁全体の反力土圧と曲げモーメントを考慮する設計法であるのに対して、假想ばり法の設計が海底面以下の反力土圧と曲げモーメントの影響が反映されにくい設計法であるためである。この試設計の場合は、海底面より上の土を裏込めと考えて一



図一50 矢板に生じる最大曲げモーメントと設計震度の関係 (砂質土地盤)



図一51 矢板に生じる最大曲げモーメントと設計震度の関係 (粘性土地盤)

定の条件にしており、裏込めと原地盤の境界の高さを何mに設定するかによってこの傾向には変化が生じる。しかしながら、傾向として仮想ばり法は地盤が軟弱な場合、曲げモーメントにその影響が反映されにくいケースがでてくると考えられる。

次に、土質条件を前節で述べた仮想ばり法とたわみ曲線法の適用境界である $\phi=30^\circ$ 、 $C_0=5\text{tf/m}^2$ に固定して、構造諸元を与える影響の大きい設計震度を変化させて両設計法の結果を比較した。設計震度の上限値は、図一8より0.25での適用はきわめてまれであることから0.20とした。設計結果を図一48～51に示す。傾向としては土の強度を変化させた場合と同様で、必要根入れ長は設計震度にかかわらず3～5m程度、たわみ曲線法による方が長くなる。また、矢板に働く最大曲げモーメントは設計震度が大きいほど仮想ばり法とたわみ曲線法の差が大きくなり、設計震度が低くなるにつれてその差は急激に縮まる。設計震度が0.05の場合、両設計法の差は40%程度であるが、0.20の場合、その差は100%以上となる。

6. あとがき

本資料は、矢板式係船岸の構造諸元について、過去の設計事例を整理・分析したものである。今回の分析によって、設計条件から構造諸元のおおまかな値を類推するための図表を作成することができた。この結果は、繰り返し計算の手順の簡素化や設計計算結果の妥当性のチェックのための参考資料となるものである。また、軟弱地盤上や剛度の高い矢板を用いた設計を行う際に、矢板壁の設計法を決定するにあたって参考となる図表を、設計事例の分析や軟弱地盤をモデルにした試設計による検討を行って作成した。

ここで得られた図表は、いずれも既存の設計事例をもとにして作成したものである。したがって、例えば設計法に関する図表などは、理論的な考察を行ったものではなく、あくまでも過去の事例を反映したものであることには注意を要する。現行の矢板壁の設計法は十分に完成されたものとはいえず、特に矢板の剛度については、剛度が非常に高い場合はたわみ曲線法によって設計を行ってもなお危険側となる可能性があることなどが指摘されている。実際の矢板壁の設計にあたっては様々な条件を設計者が総合的に勘案して、適切な設計法を採用する必要がある。

本研究をまとめるにあたっては、片岡前計画設計基準部長、木阪計画設計基準部長、塩見前設計基準研究室長、寺内設計基準研究室長より、懇切なご指導、御助言を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

(1994年6月30日受付)

参考文献

- 1) 堀川洋, 神田勝己, 堀家正; ケーソン式混成防波堤構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料No.644, 1989.
- 2) 堀家正, 春日井康夫; ケーソン式係船岸の構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料No.702, 1991.
- 3) 老平武弘, 塩見雅樹; 直ぐい式横栈橋の構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料No.749, 1993.
- 4) 財団法人日本港湾協会, 運輸省港湾局監修; 港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版, 1989.
- 5) 腐食防食協会; 防食技術便覧, 日刊工業新聞社, 1990.
- 6) 財団法人沿岸開発技術研究センター; 港湾鋼構造物防食マニュアル, 1986.
- 7) 高橋邦夫, 菊池喜昭, 朝木裕次; タイロッド式矢板壁の力学特性の解析, 港湾技研資料No.756, 1993.
- 8) 石黒健, 高橋邦夫; 横荷重を受ける杭と矢板の縦梁解法, 山海堂, 1992.

港湾技研資料 No. 780

1994. 9

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 株式会社 昭和工業写真印刷所

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

Copyright © (1994) by P.H.R.I

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

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。