

港 湾 技 研 資 料

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

No. 435 Dec. 1982

カーテン式防波堤の自動設計

岩	崎	正	二
内	田	豊	彦
福	井	正	幸
外	山	進	一

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. システムの大要	3
2.1 基本方針	3
2.2 防波堤天端高とカーテン壁の深さ	5
2.3 外力	5
2.4 杭	16
2.5 フロー	17
3. 設 計 法	18
3.1 モーメント・せん断力・軸力・天端変位量	18
3.2 杭の応力度	26
3.3 杭の根入長	26
3.4 ネガティブフリクション	27
3.5 継ぎ杭	28
3.6 横方向地盤反力係数	28
4. システムの評価	29
4.1 項目	29
4.2 設計条件	29
4.3 結果	30
4.4 計算例	45
5. あとがき	46
参 考 文 献	46

Automatic Design of Curtain Wall Type Breakwater

Shoji IWASAKI*
Toyohiko UCHIDA**
Masayuki FUKUI ***
Shin-ichi TOYAMA****

Synopsis

This report presents the system and the design method of the automatic design system for curtain wall type breakwater.

Using this system, we are able to design curtain wall type breakwater.

This system has two functions as follows:

- (1) To calculate stresses of piles, bearing capacities of piles, deflections of superstructures and the costs required for the structures.
- (2) To calculate the dimension of piles which minimize the costs of structures being given allowable stresses and deformations.

* Member of Automatic Design Laboratory, Design Standard Division
** Ex-Chief of Automatic Design Laboratory, Design Standard Division
*** Senior Research Engineer, Design Standard Division
**** Chief of Automatic Design Laboratory, Design Standard Division

カーテン式防波堤の自動設計

岩 崎 正 二*
内 田 豊 彦**
福 井 正 幸***
外 山 進 一****

要 旨

港湾構造物の設計の自動化の一環として、カーテン式防波堤の自動設計システムを開発し、ここに報告する。

本システムは、互層地盤に築造されたカーテン式防波堤の基本設計を対象としており、与えられた断面に対して、杭に生じる応力度、支持力、天端の変位量を計算し、さらに工費を求める機能と、所定の許容応力度、許容変位量を満足する杭のうち法線方向1 m当りの工費が最小となる杭断面、根入長を求める機能を有する。

1. まえがき

昭和45年度より設計の合理化、省力化を目的として、港湾構造物の設計の自動化の研究が進められてきており、これまでにケーソン式防波堤、矢板式係船岸、ジャケット式鋼製護岸など数多くの自動設計プログラムが開発され、港湾建設局等の設計実務において活用されている。

カーテン式防堤は、材料が小量であること、また、軟弱であっても、大きな改良をしなくて済み、このため通常の混成堤に比べて、工費が節約できる。しかし通常の防波堤のように自重で波力に抵抗することはなく、波力は全て支持杭に伝えられているから大きな波高の来る所には適さないという弱点をもっている。こうした点からカーテン式防波堤は、大きな港の波除堤とか比較的静かな湾や入江で防波堤として用いられる。構造は、軽量で水粒子の動きの激しい水面付近をカーテン壁でしゃ断する形式のものである。本システムは、直杭式、組杭形式、ラーメン形式、二重カーテン形式のカーテン式防波堤の基本設計を対象としている。

2. システムの概要

2.1 基本方針

(1) カーテン式防波堤の基本設計を対象としている。
本システムでは図-1から図-4に示すようなカーテン式の直杭形式(T-1)、組杭形式(K-1, K-2)、ラーメン形式(R-1, R-2)、二重カーテン形式(W-1, W-2)を対象としている。各タイプの1は図に示すようにカーテンのあるもの、2はカーテンのかわりに矢板を用いたものである。

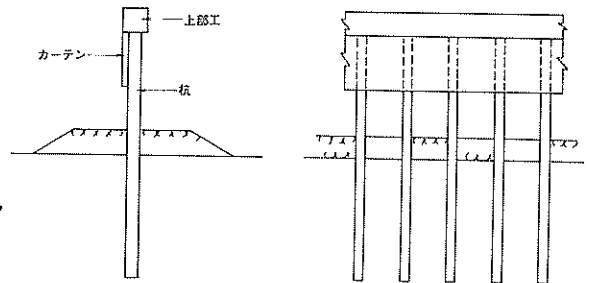


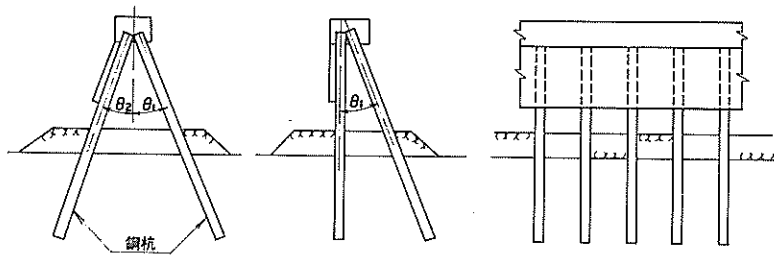
図-1 直杭形式(T-1タイプ)

* 設計基準部 自動設計研究室

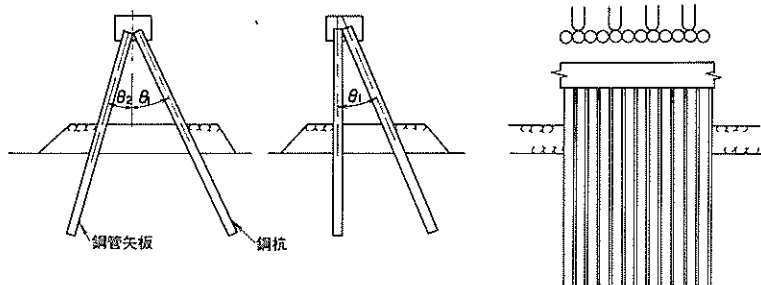
** 前設計基準部 自動設計研究室長

*** 設計基準部 主任研究官

**** 設計基準部 自動設計研究室長

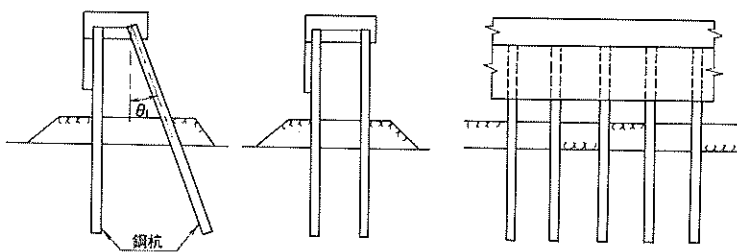


(a) K-1タイプ

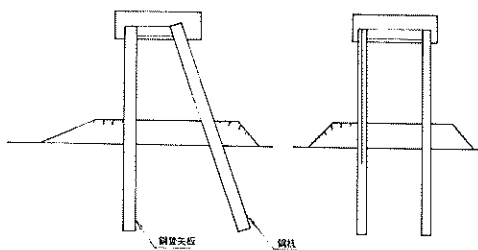


(b) K-2タイプ

図-2 組杭形式



(a) R-1タイプ



(b) R-2タイプ

図-3 ラーメン形式

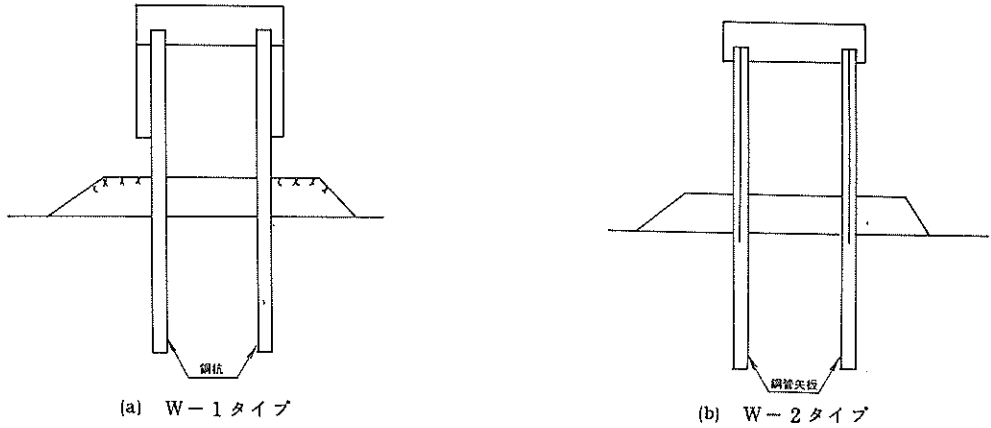


図-4 二重カーテン式

(2) 与えられた杭断面に対して、設計計算を行う機能並びに矢板、杭断面の自動選定（所定の許容応力度等を満足し、工費（材料費）が最小となる断面を自動的に選定する）機能をもたせる。

(3) 設計法は、“港湾の施設の技術上の基準・同解説”¹⁾に基づくことを原則とする。これに明記されていない事項については、実施例を参考にして決定する。

(4) 設計法として複数の方法が状況に応じて使い分けられる場合は、現在用いられている方法はできるだけシステムの中に組み込み利用範囲を広げる。

2.2 防波堤天端高とカーテン壁の深さ（図-5、6 参照）

防波堤天端高とカーテン壁の深さの決定は、天端よりの波高伝達率が無い場合の実験から得られている森平等²⁾のグラフを用いる。ただし、システムには組み込んでいないが越波を許す場合は、天端よりの越波による波高伝達率 K_0 とカーテン下部よりの波高伝達率 K_w より全伝達率として $K_T = \sqrt{K_0^2 + K_w^2}$ で求める必要がある。また

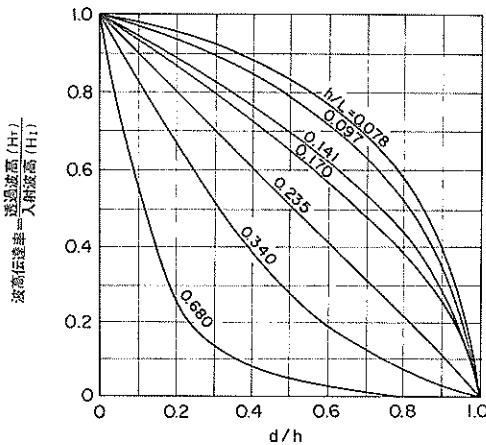


図-5 波高伝達率とd/hの関係

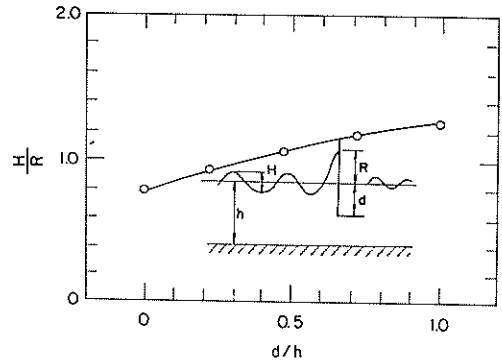


図-6 カーテン防波堤の天端高算定曲線

二重カーテン形式については、適切な検討方法がないため防波堤天端高とカーテン壁の深さは、常に入力で指示することとしている。

2.3 外力

(1) 作用外力の組合せ

作用外力として上部工自重、上載荷重（常時、異常時）、杭の自重（中詰砂を含む）、波力（港外、港内より）、浮力（杭及び上部工に作用）、地震力（港外、港内より）、船舶の接岸及びけん引時荷重、揚圧力、動水圧（港外、港内より）の各荷重を考慮して安定計算を行う。

- a) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港外より常時波圧の山
- b) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港外より常時波圧の谷
- c) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港外より異常時波圧の山
- d) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港外より異常時波圧の谷
- e) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港

内より常時波圧の山

f) 上部工自重+杭自重+波圧常上載荷重+浮力+港

内より異常時波圧の山

g) 上部工自重+杭自重+波圧時上載荷重+浮力+港内より揚圧時波圧+揚圧力

h) 上部工自重+杭自重+地震時上載荷重+浮力+港外より地震力(上部工, 杭, 上載荷重に作用)+港外より動水圧

i) 上部工自重+杭自重+地震時上載荷重+浮力+港

内より地震力(上部工, 杭, 上載荷重に作用)+港内より動水圧

j) 上部工自重+杭自重+船舶接岸時上載荷重+船舶接岸力+浮力

k) 上部工自重+杭自重+船舶接岸時上載荷重+船舶けん引力+浮力

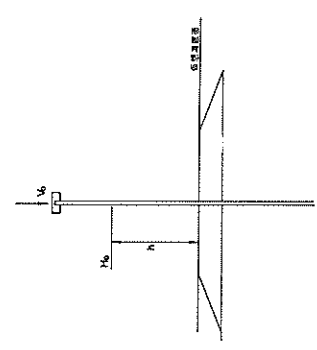
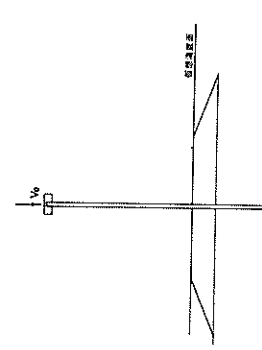
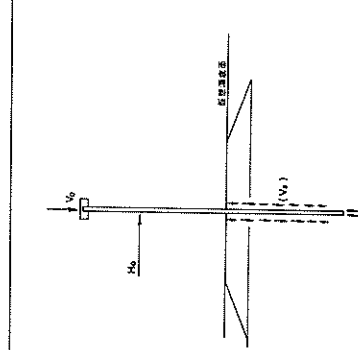
また、設計荷重の常時、異常時取扱いと構造形式との組合せは、表-1の通りとする。各構造形式における荷重状態は表-2の通りである。

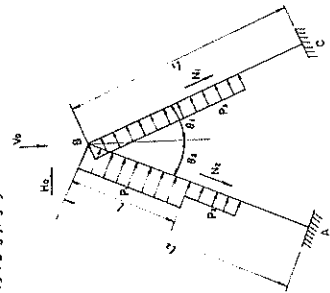
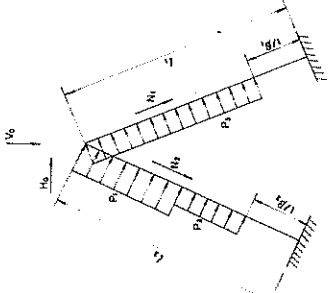
表-1 設計荷重の取扱いと設計対象形式との組合せ

荷重	取扱い	形式	T-1	K-1	K-2	R-1	R-2	W-1	W-2
			a	常時	○	○	○	○	○
b	常時	○	○	○	○	○	○	○	
c	異常時	○	○	○	○	○	○	○	
d	異常時	○	○	○	○	○	○	○	
e	常時		○	○	○	○	○	○	
f	異常時		○	○	○	○	○	○	
g	異常時				○	○			
h	異常時	○	○	○	○	○	○	○	
i	異常時		○	○	○	○	○	○	
j	常時 or 異常時	○	○	○	○	○	○	○	
k	常時 or 異常時	○	○	○	○	○	○	○	

注) ○印は杭の応力度, 支持力の検討を行う事を示す。

表-2 設計外力及び荷重の組み合わせ

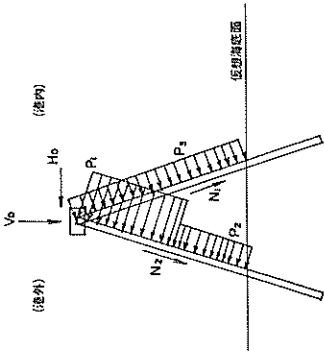
検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時	(a) 直ぐい式
くいの応力度	H_0	①波圧合力	①動水圧の合力 ②載荷重, 上部工及びカーテンに作用する地震力 ③仮想海底面より上のくい及び中詰砂に作用する地震力	①船舶接岸力またはけん引力 ○地震時に同じ, ただし載荷重は常時の値を用いる。	
	V_0	①上部工及びカーテンの自重 (浮力を考慮する) ②くい及び中詰砂の自重 (くい全長にわたって考慮する) (浮力を考慮する)	①載荷重, 上部工及びカーテンの自重 ②は左記に同じ。		
くいの支持力	V_0	くいの応力度に同じ。	くいの応力度に同じ。	くいの応力度に同じ。	
	ネガティブフリクション	H_0 V_0	①波圧合力 ②くいの支持力の場合の波圧時の V_0 ②ネガティブフリクション (V_0)		

検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時	(b) 斜ぐい式
くの応力度	H_0	①上部工に作用する波圧合力	①載荷重及び上部工に作用する地震力 ②上部工に作用する動水圧	①船舶接岸力またはけん引力	(イ) 港外側から波力あるいは地震力が作用する場合及び船舶接岸時(又はけん引時)
	V_0	①上部工の自重(浮力を考慮する)	①上部工の自重(浮力を考慮する) ②上部工の自重(浮力を考慮する)	①左記と同じ。 ②載荷重(常時)	
	p_1	①カーテン部に作用する換算波圧強度 ②カーテン、くい及び中詰砂1m当りの自重のくい軸直方向成分(浮力を考慮する)	①カーテン部に作用する換算動水圧 ②左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ③カーテン、くい及び中詰砂1m当りに作用する地震力のくい軸直方向成分	①地震時の②に同じ。	 (計算法①の場合)
	p_2	①くい部に作用する換算波圧強度 ②くい及び中詰め砂1m当りの自重のくい軸直方向成分(浮力を考慮する)	①くい部に作用する換算動水圧 ②左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ③くい及び中詰め砂1m当りに作用する地震力のくい軸直方向成分	①地震時の②に同じ。	
	p_3		①くい及び中詰め砂1m当りに作用する地震力のくい軸直方向成分 ②くい及び中詰め砂1m当りの自重のくい軸直方向成分	地震時に同じ。	 (計算法②の場合)
	N_1	①仮想海底面より上のくい及び中詰砂の自重のくい軸方向成分(浮力を考慮する)	①左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分	①地震時の①に同じ。	
	N_2	①カーテン及び仮想海底面から上のくい及び自重のくい軸方向成分(浮力を考慮する)	①左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ②カーテン及び仮想海底面から上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分	①地震時の①に同じ。	

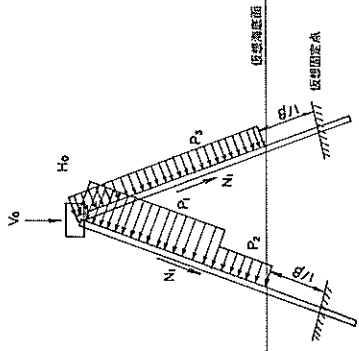
検査項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時
くい の 支持力	H_0 V_0 p_1 p_2 p_3	いずれもくいの応力度の検討に同じ。	①左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ②くい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長にわたって考慮する)	①地震時の①に同じ。
ネガティブ フリクション	H_0 V_0 p_1 p_2	①くい及びくいの自重のくい軸方向成分(くい全長にわたって考慮する) ②カーテン及びくいの自重のくい軸方向成分(くい全長にわたって考慮する)	①左記に同じ(浮力の範囲は異なる) ②カーテン及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長にわたって考慮する)	①地震時の①に同じ。
	N_1	①くいの支持力の検討①に同じ。 ②くい軸方向について求めたネガティブフリクション		

検討項目	荷重	波	圧	時	地	震	時
くいの応力度	H_0 V_0 p_1 p_2 p_3	前図のように、 H_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 が(イ)の場合の逆向きになる。 V_0 は同じ。ただし、波の谷の時は $p_3 = 0$ 。	波圧時に同じ。	波圧時に同じ。	波圧時に同じ。	波圧時に同じ。	波圧時に同じ。
	N_1						
くい	N_2	①カーテン及び仮想海底面より上のくい及び中詰め砂の自重のくい軸方向成分。(浮力を考慮する)	①左記に同じ。 ②カーテン及び仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②カーテン及び仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。
	H_0 V_0 p_1 p_2 p_3	いずれもくいの応力度の検討に同じ。	①左記に同じ。 ②くい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②カーテン及び仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分。
ネガティブフリクション	H_0 V_0 p_1 p_2	くい応力度の検討に同じ。ただし、常時荷重として取扱う波について求める。	くい軸方向成分(くい全長) (浮力を考慮する)	くい軸方向成分(くい全長)	くい軸方向成分(くい全長)	くい軸方向成分(くい全長)	くい軸方向成分(くい全長)
	N_1						
ネガティブフリクション	N_2	①カーテン、くい及び中詰め砂の自重のくい軸方向成分(くい全長) (浮力を考慮する)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)
	H_0 V_0 p_1 p_2	くい軸方向成分(くい全長) (浮力を考慮する)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)
ネガティブフリクション	N_1	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)
	N_2	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)	①左記に同じ。 ②仮想海底面より上のくい及び中詰め砂に作用する地震力のくい軸方向成分(くい全長)

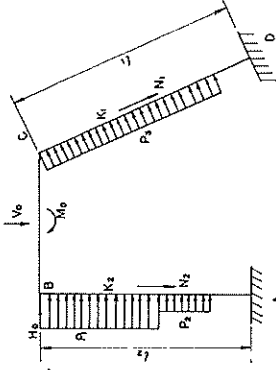
(イ) 港内側から波力あるいは地震力が作用する場合及び港外側に波の谷がある時

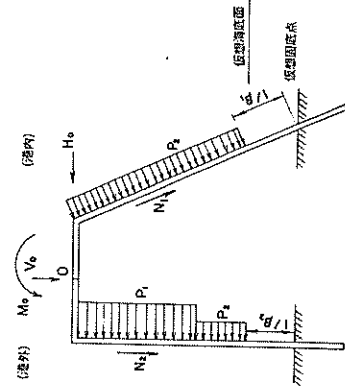


(計算法①の場合)



(計算法②の場合)

検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時	(c) ラーメンタイプ
くいの応力度	M_0	①上部工に作用する波圧合力による0点まわりの曲げモーメント ②上部工の自重(浮力を考慮する)による0点まわりの曲げモーメント	①墩荷重及び上部工に作用する地震力、動水圧による0点まわりの曲げモーメント ②墩荷重及び上部工自重(浮力を考慮する)による0点まわりの曲げモーメント	①船舶接岸力または、けん引力による0点まわりの曲げモーメント	(f) 港外側から波力あるいは、地震力が作用する場合及び船舶接岸時(または、けん引時)
くいの支持力	H_0 V_0 p_1 p_2 p_3 N_1 N_2	斜ぐい式に同じ。			
ネガティブフリクション		M_0 はくいの応力度に同じ, その他の荷重は, 斜ぐい式に同じ。 M_0 は, くいの応力度に同じ, ただし, 常時荷重として取扱う波について求める。その他の荷重は斜ぐい式に同じ。			

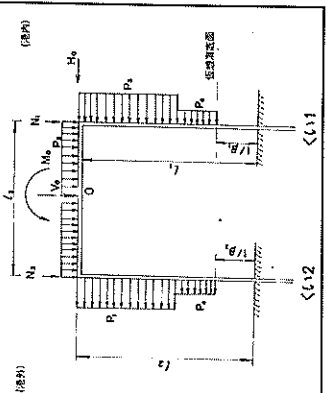
検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	(e) 港内側から波力あるいは地震力が作用する場合及び港外側に波の谷がある時
くいの応力度		M_0, H_0, p_1, p_2, p_3 は, ①の場合の逆向きとなる。	左記に同じ。	
くいの支持力		N_1, N_2 は, 斜ぐい式Fと同じ。 V_0 は, 必要に応じて①の場合の荷重に揚圧力を追加する。ただし, 波の谷の時は, $p_3 = 0$ 。		
ネガティブフリクション		M_0, H_0, p_1, p_2, p_3 は, くいの応力度に同じ, ただし, 常時荷重として取扱う波について求める。 N_1, N_2 は, 斜ぐい式に同じ。		

検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時	(d) 二重カーテンタイプ
くいの応力度	M_0	①上部工に作用する波圧合力による0点まわりの曲げモーメント ②上部工の自重のうち等分布荷重とみなせない部分による0点まわりの曲げモーメント	①載荷重及び上部工に作用する地震力による0点まわりの曲げモーメント ②上部工に作用する動水圧による0点まわりの曲げモーメント	①船舶接岸力またはけん引力による0点まわりの曲げモーメント	<p>(d) 二重カーテンタイプ</p> <p>① 港外側から波力あるいは地震力が作用する場合及び船舶接岸時 (または、けん引時)</p>
	H_0	①上部工に作用する波圧合力	①載荷重及び上部工に作用する地震力 ②上部工に作用す。動水圧	①船舶接岸力または、けん引力	
	V_0	①上部工の自重のうち等分布荷重とみなせる部分の自重	①左記に同じ(ただし、浮力の働は異なる)	①左記に同じ。	
	p_1	①カーテン部に作用する換算波圧強度	①カーテン部に作用する換算動水圧 ②カーテン、くい及び中詰め砂1 m 当りに作用する地震力		
	p_2	①くい部に作用する換算波圧強度	①くい部に作用する換算動水圧 ②くい及び中詰め砂1 m 当りに作用する地震力		
	p_3		① } p_1 に同じ(ただし、くい1の諸元を用いる) ② }		
	p_4		① } p_2 に同じ(ただし、くい1の諸元を用いる) ② }		
	p_5	①上部工の自重のうち等分布荷重とみなせる部分の荷重強度(自重)	①左記に同じ(ただし、浮力の働は異なる) ②載荷重(地震時)	①左記に同じ。 ②載荷重(常時)	
	N_1	①カーテン及び仮想海底面より上のくい及び中詰め砂の自重	①左記に同じ(ただし、浮力の働は異なる)	①左記に同じ	
	N_2	①カーテン及び仮想海底面より上のくい自重	①左記に同じ(ただし、浮力の働は異なる)	①左記に同じ。	

検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時
くい の 支 持 力	M_0 H_0 V_0 $p_1 \sim p_5$	い ず れ も く い 応 力 度 の 検 討 に 同 じ。	／	／
	N_1			
ネガティブ フリクション	M_0 H_0 V_0 $p_1 \sim p_5$	く い 応 力 度 の 検 討 と 同 じ、 た だ し 常 時 荷 重 と し て 取 扱 う 波 に つ い て 求 め る。	／	／
	N_1			
／	N_2	①カーテン、くいの自重(くい全長にわたって考慮する)	①左記に同じ(ただし、浮力の値は異なる)	①左記に同じ。
	N_2	①カーテン、くいの自重(くい全長にわたって考慮する)	①左記に同じ(ただし、浮力の値は異なる)	①左記に同じ。
／	M_0 H_0 V_0 $p_1 \sim p_5$	く い 応 力 度 の 検 討 と 同 じ、 た だ し 常 時 荷 重 と し て 取 扱 う 波 に つ い て 求 め る。	／	／
	N_1			
／	N_2	①くいの支持力の検討①に同じ。 ②ネガティブフリクション	／	／
	N_2	くいについては、ネガティブフリクションの検討に行わない。	／	／

検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時
くい の 応 力 度	M_0 H_0 $p_1 \sim p_4$	1)の逆向き。ただし、波の谷の時は、 $p_3 = 0, p_4 = 0。$	／	／
	V_0 p_5			
／	N_1	1)の場合と同じ。	／	／
	N_2	1)の場合の N_1 と同じ。	／	／

(e) 港内側から波力あるいは地震力が作用する場合、及び港外側に波の谷がある時。



検討項目	荷重	波 圧 時	地 震 時	船舶接岸時またはけん引時
くいの支持力	M_0 H_0 $p_1 \sim p_2$ V_0 p_5	いずれもくいの応力度の検討に同じ。		
	N_1			
ネガティブフリクション	N_2	1) の場合の N_2 と同じ。		
	H_0 $p_1 \sim p_4$ V_0 p_5	1) の場合の N_1 と同じ。		
	N_1	いずれもくいの応力度の検討に同じ。ただし、常時荷重として取扱う波について求める。		
	N_2			
		くいの1についてはネガティブフリクションの検討は行わない。		
		①くいの支持力の検討に同じ。 ②ネガティブフリクション		

(2) 波圧の計算法は、合田式、広井式、部分砕波圧を考慮したサンフルーの簡略式及びサンフルーの簡略式とし、それぞれの波の山・谷が来る場合の計算ができる。

合田式と従来式の別、従来式の中での部分砕波式、サンフルー式の別は、利用者が入力データで指定する。また、従来式においてマウンド水深(d)と設計波高(H_D)の比が2未満の場合は、広井式、2以上の場合は、部分砕波式(またはサンフルー式)をプログラム内で自動的に選定する。各波力の算定式は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」第2編第5章5.2「直立壁に作用する波力」によっている。

a) 検討水位

水位により防波堤に作用する波力が変化するので初期仮定断面に対して、L.W.LからH.H.W.Lの間を10cm間隔で水位を変化させて繰返し計算を行い、各水位における杭の地中部最大曲げモーメントを求める。このうち、杭の地中部最大曲げモーメントが最大となる水位を最終的な検討水位とした。

b) 仮想海底面と波圧の作用範囲

防波堤の場合、杭の横抵抗の計算を行う時の地表面として海底面がとられる。ただし、防波堤の場合であっても捨石マウンドがある場合には、捨石マウンドが杭の横抵抗に対して有効であるかどうかによって杭の横抵抗の計算を行う時の地表面は必ずしも実際の海底面にとられるとは限らない。そこで本システムでは、杭の横抵抗の計算を行う時の地表面を実際の海底面とは別に考えることとし、これを仮想海底面と呼ぶこととする。仮想海底面の位置は、入力データで指定できるが、指定のない場合は、海底面の位置にとられる。ただし、波圧の計算は、入力データで波圧の作用下端を指定できる。指定のない場合は、海底面から上に波圧が作用するものとする。波圧の作用範囲の上端は、上部工天端までとしている。ただし、波圧の計算式により求められた波の作用高さが上記天端より低い場合は、波圧式による作用高さまでとしている。

波力は、港外側から波のくる場合は、港外側の杭及びカーテンに作用する。港内側から波のくる場合には、港外、港内ともに作用する。ただし、二重カーテン形式の場合は、港内側から波のくる場合は、港内側の杭及びカーテンにのみ作用する。

(3) 浮力

浮力の作用範囲は、各荷重状態ごとに次の通りとする。

a) 揚圧時

i) 上部工に作用する浮力

ii) 揚圧時の波の場合

上部工には浮力が働かないとする。

ロ) 越波する場合で揚圧時の波でない場合、上部工全体に浮力が働くとする。

ハ) 越波しない場合で揚圧時の波でない場合

① 港内側からの波がT-1, R-1, R-2, K-1, K-2タイプに作用する場合(検討水位+波の打上げ高)のレベルにより下側の上部工に浮力が働くと考ええる。

② 二重カーテンタイプの防波堤で港外側からの波が作用する場合は、上部工には浮力が働かないとする。

ii) 杭及びカーテンに作用する浮力

表-3の水位により下側の部分に浮力が働くとする。

表-3 杭・カーテンに作用する浮力

		港外側	港内側	
港外側からの波の山	越波	上部工天端	上部工天端	
	越波しない	合田式	検討水位 + η^*	検討水位
		広井式	検討水位 + $1.25H_D$	検討水位
黒田 or サンフル式		検討水位 + $(H_D + \delta_0)$	検討水位	
港の外波から谷	越波	上部工天端	上部工天端	
	越波しない	検討水位 - $0.5H_D$	検討水位	
港内側からの波の山	越波	上部工天端	上部工天端	
	越波しない	合田式	検討水位	検討水位 + η^*
		広井式	検討水位	検討水位 + $1.25H_D$
黒田 or サンフル式		検討水位	検討水位 + $(H_D + \delta_0)$	

(4) 上部工に作用する揚圧力

港内側にカーテン壁がなく、かつ上部工の幅が広くなると揚圧力が考えられる。ラーメンタイプについては、港内側からの波圧作用時に揚圧力を考慮できる。

揚圧力は式(1)によるものとする。

$$p = 4 \cdot w_0 \cdot H \dots\dots\dots (1)$$

ここに

p ; 揚圧力 (tf/m²)

w_0 ; 水の単位体積重量 (tf/m³)

H ; 入射波高 (m)

揚圧力を考慮した場合は、異常時としての安全率、許容応力度によりチェックする。

(5) 動水圧

地震時の検討においては、図-7に示すように動水圧を考慮する。

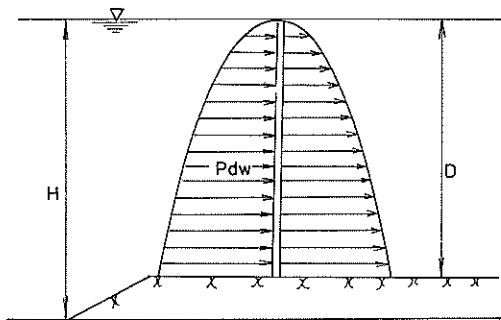


図-7 動水圧

a) 壁体に作用する動水圧については、式(2)、(3)による。

$$p_{dw} = \frac{7}{8} \cdot k \cdot \gamma_w \sqrt{H \cdot D} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに

- p_{dw} ; 動水圧 (tf/m²)
- k ; 設計震度
- γ_w ; 水の単位体積重量 (tf/m³)
- D ; 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)
- H ; 水深 (m)

動水圧の合力

$$p_D = \frac{7}{12} \cdot k \cdot \gamma_w \cdot \sqrt{H} \cdot D^{3/2} \quad (\text{片側について})$$

の動水圧) $\dots\dots\dots (3)$

b) 計算上、動水圧を分布荷重として取扱う場合は、荷重の等しい等分布荷重に置換えて取扱う(以下、換算動水圧という)。

① 直杭形式

両側に作用する動水圧を同時に考慮する。

② 組杭形式

換算動水圧については、直杭と同様であるがいずれもカーテン及び直角方向に動水圧を作用させる。ただし陸側の杭については、動水圧を考慮しない。

③ ラーメン形式

換算動水圧については、直杭と同様であるが陸側の杭については、動水圧を考慮しない。

④ 二重カーテン形式

換算動水圧については、直杭と同様であるが動水圧は、海側、陸側に同時に作用する。

(6) 船舶接岸力及び船舶けん引力

船舶接岸力及び船舶けん引力は、集中荷重として計算する。二重カーテン形式及びラーメン形式の場合は、上部工重心まわりの曲げモーメントを考慮することができる。

2.4 杭

(1) 杭の横抵抗の計算方法は、直杭形式の場合は、港研方式及びチャンの方法、その他の形式の場合は、チャンの方法により計算をする。

(2) 杭の鉛直支持力の計算において先端閉塞効果を必要に応じて考慮できるものとする。

(3) ネガティブフリクション、圧密沈下の斜杭の曲げモーメントを考慮する³⁾。

(4) 杭の種類は、H型钢杭、鋼管杭、矢板の種類は、鋼管矢板とする⁴⁾。

杭、矢板の種類と範囲は、実施例と施工性を考慮して次のように決めた。

- ① ミリサイズ鋼管矢板(二港湾型継手タイプ)
径600.0 mm, 肉厚9.0 mmから径2,000.0 mm, 肉厚300.0 mmまでの134種類。
 - ② ミリサイズ鋼管矢板(パイプ型継手タイプ)
径600.0 mm, 肉厚9.0 mmから径2,000.0 mm, 肉厚300.0 mmまでの134種類。
 - ③ インチサイズ鋼管矢板(二港湾型継手タイプ)
径609.6 mm, 肉厚9.0 mmから径2,032.0 mm, 肉厚300.0 mmまでの134種類。
 - ④ インチサイズ鋼管矢板(パイプ型継手タイプ)
径609.6 mm, 肉厚9.0 mmから径2,032.0 mm, 肉厚300.0 mmまでの134種類。
 - ⑤ ミリサイズ鋼管杭
径600.0 mm, 肉厚7.0 mmから径2,000.0 mm, 肉厚400.0 mmまでの167種類。
 - ⑥ インチサイズ鋼管杭
径609.6 mm, 肉厚7.0 mmから径1,524.0 mm, 肉厚250.0 mmまでの118種類。
 - ⑦ H型钢管
高さ2,000.0 mm, 幅200.0 mmから高さ498.0 mm, 幅432.0 mmまでの28種類。
- なお、材質の指定により表-4に示す許容応力度の値を用いることができる。
- (5) 腐食による断面係数の減少量を考慮する。
 - (6) 継ぎ杭を考慮する。

表-4 鋼ぐい材の許容応力度

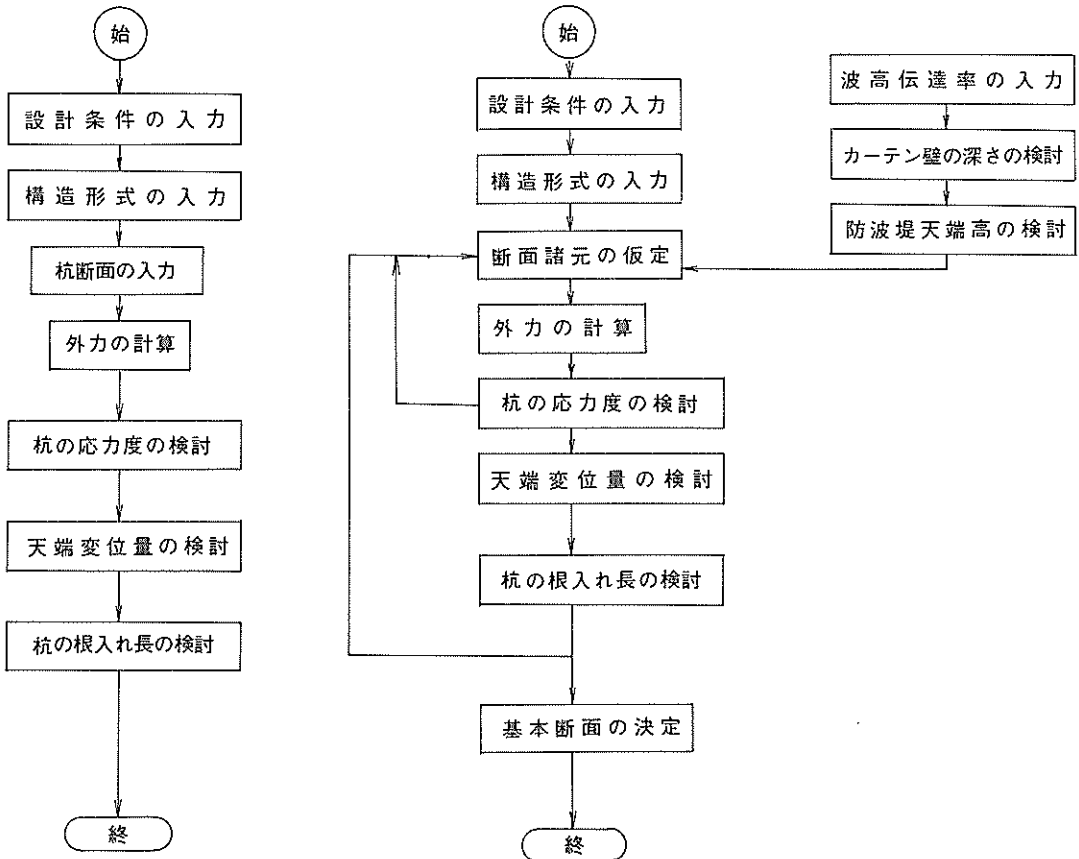
(kgf/cm²)

鋼管	SS41, SM41 SMA41, STK41	SM50, STK50	SM50Y, SMA50
応力度の種類			
曲げ引張応力度 (純断面積につき)	1,400	1,900	2,100
軸方向圧縮応力度 (純断面積につき)	$\frac{l}{r} \leq 20$ 1,400 $20 < \frac{l}{r} < 93$ $1,400 - 8.4 \left(\frac{l}{r} - 20 \right)$ $\frac{l}{r} \geq 93$ $\frac{12,000,000}{6,700 + (l/r)^2}$	$\frac{l}{r} \leq 15$ 1,900 $15 < \frac{l}{r} < 80$ $1,900 - 13 \left(\frac{l}{r} - 15 \right)$ $\frac{l}{r} \geq 80$ $\frac{12,000,000}{5,000 + (l/r)^2}$	$\frac{l}{r} \leq 14$ 2,100 $14 < \frac{l}{r} < 76$ $2,100 - 15 \left(\frac{l}{r} - 14 \right)$ $\frac{l}{r} \geq 76$ $\frac{12,000,000}{4,500 + (l/r)^2}$
せん断応力度	800	1,100	1,200
降伏点応力度	2,400	3,200	3,600

2.5 フロー

杭断面をあらかじめ、入力データとして与える場合と、

杭断面を自動的に求める場合とでは、システムのフローが多少異なる。



(a) 断面を与える場合

(b) 自動的に断面を求める場合

図-8 システムの構成及びフロー

図-8(a)は、断面があらかじめ与えられている場合のシステムの構成と処理の流れを示しているが、基本的には従来の手計算による設計の流れに従い手計算から電子計算機に置き換えて処理している。

この場合のフローは、設計の対象が何であるかを区別並びに潮位、水深、波高、土質等の設計条件と杭の断面を入力データとして与えるところから始まる。次に設計外力として、あらかじめ入力データにより指示された波圧公式により波圧強度、波圧合力とその作用位置、地震力等を求める。これらの値を設計荷重とし杭あるいは矢板に生じる最大曲げモーメント、応力度並びに天端の変位量を計算するとともに杭の根入長を求める。最終的には、与えられた断面に対する波圧、杭の応力度等の計算結果と最終断面における工費を計算しプリントする。

図-8(b)は、断面の自動選定の場合で、あらかじめファイルに登録されている杭の中から初期断面がセットされる。初期断面は、H型鋼杭の場合は、断面係数の小さいもの、鋼管矢板、鋼管杭の場合は、利用者が指定した径(使用する鋼管の最小径と最大径を入力で指定できる)のうち最小径のものを、肉厚(肉厚についても各径ごとに最小厚、最大厚を指定できる)は、その径における最小のものをセットする。次に港外側の径を固定したまま港内側の径及び港内・外の肉厚を順次変化させていき、それぞれの断面が所定の許容応力度(σ_a)、天端の変位量(δ_a)を満足するかどうかの判定を行う。許容値を満足するものの中から根入長も考慮して法線方向1m当りの工費の安いものを港外側のその径における採用断面とする。さらに鋼管の径を1ランクづつ上げて上記の方法を最大径まで繰返すことにより、港外側の径ごとにおける採用断面を求める。これらの径ごとの採用断面を相互に比較しこの中で最も法線方向1m当りの単価の安いものを最小工費断面とする。

3. 設計法

3.1 モーメント・せん断力・軸力・天端の変位量

(1) 直杭形式

a) 杭の横抵抗

波力等の分布荷重から杭1本当りに作用する集中力及びその作用位置を求め、杭の横抵抗の計算により以下の値を求める。

i) 港研方式の場合

- ① 地中部最大曲げモーメント M_{max} (tf・m)
- ② 曲げモーメント第1ゼロ点の深さ l_{m1} (m)
- ③ 地表面変位 y_0 (m)

- ④ 地表面たわみ角 i_0 (rad)
- ii) チャンの方法の場合
- ① 地中部最大曲げモーメント M_{max} (tf・m)
- ② 最大曲げモーメントを生ずる深さ l_m (m)
- ③ 地表面変位 y_0 (m)
- ④ 地表面たわみ角 i_0 (m)
- b) 天端の変位量

天端の変位量(δ)は、図-9に示すように次の3つの量の和として求める。

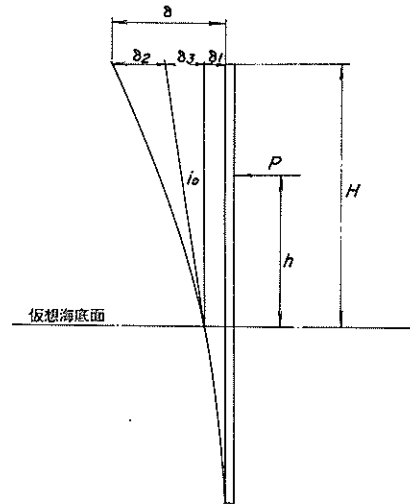


図-9 天端の変位

- i) 假想海底面でのたわみ量(δ_1)
杭の横抵抗の計算プログラムで計算する。
- ii) 假想海底面からのたわみ量(δ_2)
假想海底面を固定とし、片持ち梁としてのたわみ量を計算する。
- iii) 假想海底面でのたわみ角による假想海底面から上の杭の回転のために生ずる天端でのたわみ量(δ_3)

$$\delta_3 = l \cdot i_0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

チャン方法では、

$$i = \frac{H_0' \cdot (1 + 2 \cdot \beta \cdot Y)}{2 \cdot EI \cdot \beta^2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

- H_0' ; 水平合力
- Y ; 水平合力の作用高さ(假想海底面から測る)
- EI ; 杭の曲げ剛性(kgf・cm²)
- β ; $\sqrt[4]{\frac{k_h \cdot B}{4EI}}$

k_k ; 横方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

B ; 杭幅 (m), 矢板においては, $B = 100$ cm としている。

壁高 (l) は, 仮想海底面から上部工天端までとしている。

(2) 組杭形式

組杭形式については, 以下に示す 2 通りの計算方法によるものとする。いずれの方法を用いるかは入力データで指定することができる。(図-10 参照)

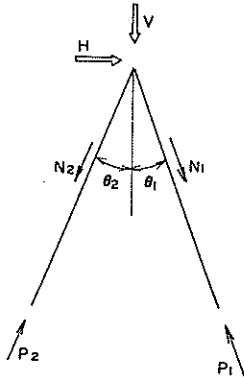


図-10 軸力(組杭)

a) 軸方向支持力のみによって抵抗すると考えた場合

i) 軸力

$$p_1 = \frac{V \sin \theta_2 + H \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} + N_1 \quad (\text{tf})$$

$$p_2 = \frac{V \sin \theta_1 - H \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} + N_2 \quad (\text{tf})$$

..... (6)

ここに

$V = V_0 + p_1, p_2$ による R_A の鉛直成分 (tf)

$H = H_0 + p_1, p_2$ による R_A の水平成分 (tf)

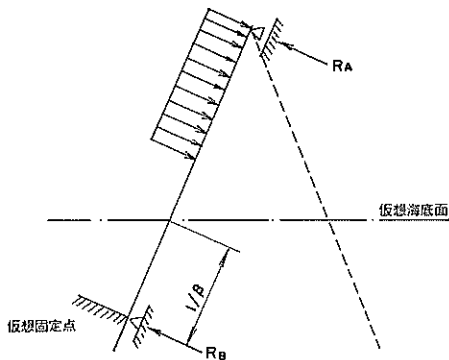


図-11 単純梁としての反力 (R_A)

R_A は, 図-11に示すように組杭の交点 A と仮想固定点 B を支点とする単純梁の A 点における反力である。 V, H の計算に用いる R_A は, 支点, 反力と方向が逆向きであることを注意する。

ii) 曲げモーメント

曲げモーメントは, 仮想固定点 B を固定端とし, 組杭の交点 A をヒンジ構造とする不静定梁として曲げモーメントを求める。(図-12 参照)

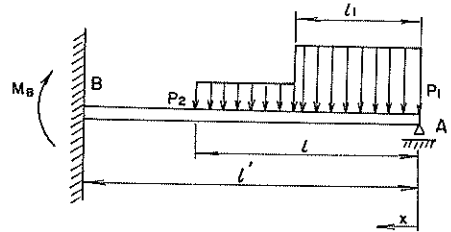


図-12 不静定梁としての曲げモーメント (M_B)

b) 杭の軸直角方向支持力も抵抗すると考えた場合 $1/\beta$ を仮想固定点として, ラーメン構造にして計算する。

i) 外側に等分布荷重が作用する場合(図-13 参照)

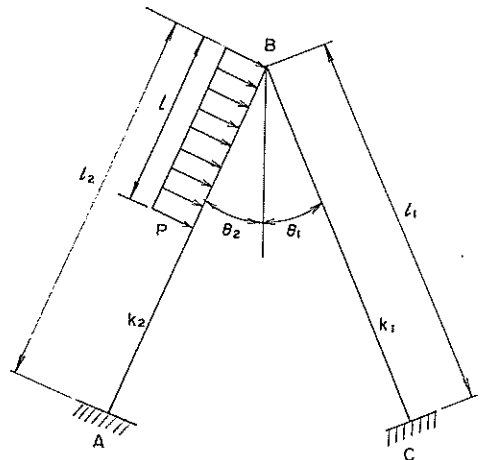


図-13 港外側の等分布荷重(組杭)

① 杭頭曲げモーメント(右回り正)

$$M_{BC} = -\frac{C_{BA}}{1+k_2}$$

$$M_{BA} = \frac{C_{BA}}{1+k_2}$$

..... (7)

ここに

$$C_{BA} = \frac{p l^2}{12 l_1^2} (6 l_1^2 - 8 l l_2 + 3 l^2)$$

$$k_2 = \frac{K_2}{K_1}$$

$$K_1 = \frac{E I_1}{l_1}$$

$$K_2 = \frac{E I_2}{l_2}$$

② 杭頭せん断力

$$S_{BC} = -\frac{1}{l_1} (M_{BC} + M_{CB}) \dots\dots\dots (8)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} \left\{ M_{BA} + M_{AB} + p l \left(l_2 - \frac{l}{2} \right) \right\}$$

ここに

$$M_{CB} = -\frac{C_{BA}}{2(1+k_2)}$$

$$M_{AB} = -\frac{k_2 C_{BA}}{2(1+k_2)} + C_{AB}$$

$$C_{AB} = -\frac{p l^3}{12 l_2^2} (4 l_2 - 3 l)$$

③ 軸力

$$N_{BC} = -\frac{S_{BA} + S_{BC} \cdot \cos \theta}{\sin \theta} \dots\dots\dots (9)$$

$$N_{BA} = \frac{S_{BA} \cdot \cos \theta + S_{BC}}{\sin \theta}$$

ここに

$$\theta = \theta_1 + \theta_2$$

ii) 内側に等分布荷重が作用する場合 (図-14 参照)

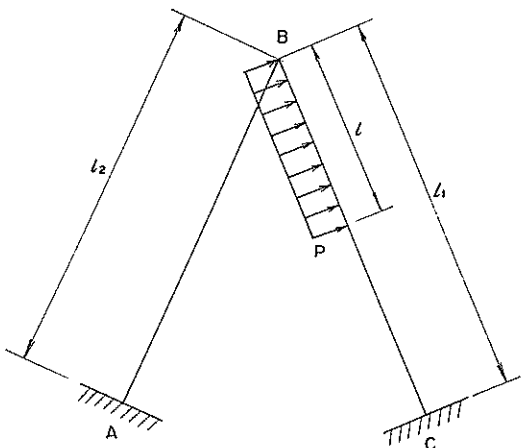


図-14 港内側の等分布荷重 (組杭)

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{BC} = \frac{k_2 C_{BC}}{1+k_2} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \dots\dots\dots (10)$$

$$M_{BA} = -\frac{k_2 C_{BC}}{1+k_2} \quad (\text{tf} \cdot \text{m})$$

ここに

$$C_{BC} = \frac{p l^2}{12 l_1^2} (6 l_1^2 - 8 l l_2 + 3 l^2)$$

② 杭頭せん断力

$$S_{BC} = -\frac{1}{l_1} \left\{ M_{BC} + M_{CB} + \left(l_1 - \frac{l}{2} \right) l p \right\} \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots (11)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} (M_{AB} + M_{BA}) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{CB} = -\frac{C_{BC}}{2(1+k_2)} + C_{CB}$$

$$M_{AB} = -\frac{k_2 C_{BC}}{2(1+k_2)}$$

$$C_{CB} = -\frac{p l^3}{12 l_1^2} (4 l_1 + 3 l)$$

③ 軸力 (図-15 参照)

$$N_{BC} = -\frac{S_{BA} + S_{BC} \cos \theta}{\sin \theta} \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots (12)$$

$$N_{BA} = \frac{S_{BA} \cos \theta + S_{BC}}{\sin \theta} \quad (\text{tf})$$

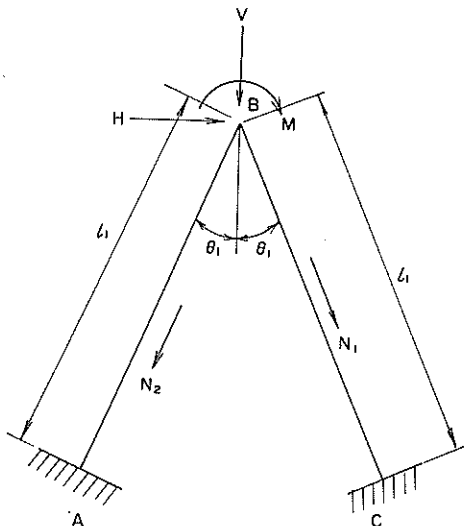


図-15 集中力とモーメント (組杭)

冊) 集中力が作用する場合

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{BC} = \frac{M}{1+k_2} \dots\dots\dots (13)$$

$$M_{BA} = \frac{k_2 M}{1+k_2}$$

② 杭頭せん断力

$$S_{BC} = -\frac{1}{l_1} (M_{BC} + M_{CB}) \dots\dots\dots (14)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} (M_{BA} + M_{AB})$$

ここに

$$M_{CB} = \frac{M}{2(1+k_2)}$$

$$M_{AB} = \frac{M}{2(1+k_2)}$$

③ 軸力

$$N_{BC} = \frac{1}{\sin \theta} (V \sin \theta_2 + H \cos \theta_2 - S_{BA} - S_{BC} \cos \theta) + N_1 \dots\dots (15)$$

$$N_{BA} = \frac{1}{\sin \theta} (V \sin \theta_1 - H \cos \theta_1 + S_{BA} \theta + S_{BC}) + N_2$$

ここに

$$\theta = \theta_1 + \theta_2$$

c) 杭中間部の曲げモーメント・せん断力の計算

(5) 参照

(3) ラーメンタイプ

a) 解析モデル

i) 杭頭曲げモーメント, 杭頭せん断力, 軸力, 杭頭の水平変位量

杭頭曲げモーメント, 杭頭せん断力, 軸力, 杭頭の水平変位量は, 仮想海底面から杭軸方向に $1/\beta$ の点を仮想固定点としたラーメン構造として求める。

ii) 杭中間部の曲げモーメント, せん断力

(5) 参照

b) 杭頭曲げモーメント, 杭頭せん断力, 軸力, 杭頭の水平変位

i) 直杭に等分布荷重が作用する場合 (図-16 参照)

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{BA} = k_2 \left(2\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \phi_1 \right) + C_{BA} \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots (16)$$

$$M_{CD} = 2\varphi_C + \phi_1$$

ここに

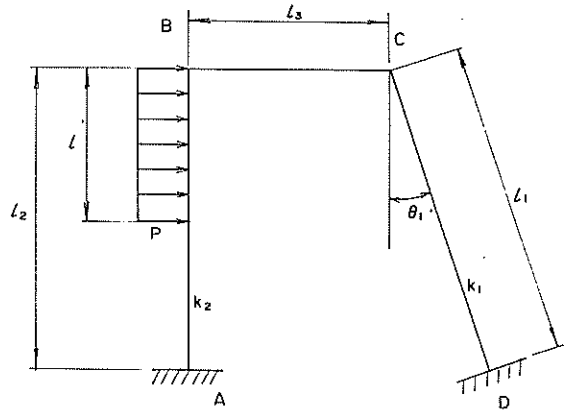


図-16 直杭に作用する等分布荷重 (ラーメン)

$$\varphi_C = \frac{B_1 \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1 \{ C_{AB} + C_{BA} + (l_2 - \frac{l}{2}) l p \} - B_2 C_{BA}}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$$

$$\varphi_B = \frac{2(1+k_3)\varphi_C + (1-k_3 \frac{\sin \theta_1}{L_3}) \phi_1}{k_3}$$

$$\phi_1 = \frac{A_1 \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1 \{ C_{AB} + C_{BA} + (l_2 - \frac{l}{2}) l p \} - A_2 C_{BA}}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$$

$$C_{BA} = \frac{p l_2}{12 l_2^2} (6 l_2^2 - 8 l l_2 + 3 l^2)$$

$$C_{AB} = -\frac{p l^3}{12 l_2^2} (4 l_2 - 3 l)$$

$$A_1 = k_3 - 4(1+k_3) \left(\frac{k_2}{k_3} + 1 \right)$$

$$A_2 = 3 \left\{ 2(1+k_3) \left(\sin \theta_1 - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1 \right) - (k_3 \sin \theta_1 - L_3) \right\}$$

$$B_1 = \frac{k_2 \cos \theta_1}{L_2} - \frac{k_3 \cos \theta_1}{L_3} - 2 \left(\frac{k_2}{k_3} + 1 \right) \left(1 - \frac{k_3 \sin \theta_1}{L_3} \right)$$

$$B_2 = 3 \left(1 - k_3 \frac{\sin \theta_1}{L_3} \right) \left(\sin \theta_1 - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1 \right) + 2 \left(k_3 \frac{\sin \theta_1}{L_3} + k_2 \frac{L_3}{L_2^2} \cos \theta_1 + L_3 \right)$$

$$k_i = \frac{K_i}{K_1}, \quad K_i = \frac{E I_i}{l_i}, \quad L_i = \frac{l_i}{L_1}$$

p; 杭軸方向 1 m 当りの荷重強度 (tf/m)

② 杭頭せん断力

$$S_{CD} = -\frac{1}{l_1} (M_{CD} + M_{DC}) \quad (\text{tf}) \dots\dots\dots (17)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} \left\{ M_{AB} + M_{BA} + \left(l_2 - \frac{l}{2} \right) l p \right\} \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{DC} = \varphi_C + \psi_1$$

$$M_{AB} = k_2 \left(\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \psi_1 \right) + C_{AB}$$

③ 軸力

$$N_{CD} = \frac{S_{CD} \sin \theta_1 - N_{BA}}{\cos \theta_1} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$N_{BA} = \frac{1}{l_3} (M_{BC} + M_{CB}) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{BC} = k_3 \left(2\varphi_B + \varphi_C - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right)$$

$$M_{CB} = k_3 \left(2\varphi_C + \varphi_B - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right)$$

④ 杭頭の水平変位

$$\delta_k = \psi_1 l_1 \cos \theta_1 \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ii) 斜杭に等分布荷重が作用する場合 (図-17 参照)

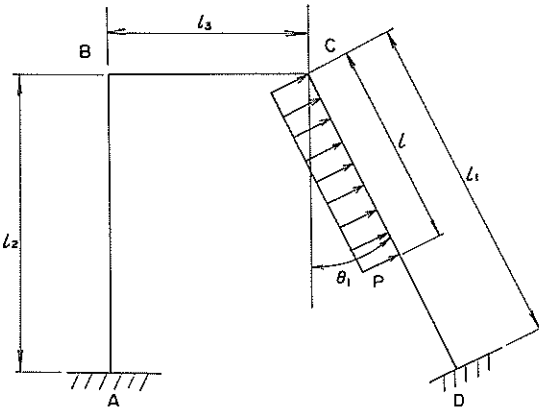


図-17 斜杭に作用する等分布荷重 (ラーメン)

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{CD} = 2\varphi_C + \psi_1 + C_{CD} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$M_{BA} = k_2 \left(2\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \psi_1 \right) \quad (\text{tf} \cdot \text{m})$$

ここに

$$\varphi_C = \frac{B_1 \left[\left\{ 3 \left(\sin \theta_1 - \frac{k_2 L_3}{k_3 L_2} \cos \theta_1 \right) + L_3 \right\} C_{CD} \dots \right.}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \dots\dots\dots$$

$$\dots + L_3 \left\{ C_{CD} + \left(l_1 - \frac{l}{2} \right) l p \right\} \dots\dots\dots$$

$$\dots + 2B_2 \left(\frac{k_2}{k_3} + 1 \right) C_{CD}$$

$$\psi_1 = \frac{A_1 \left[\left\{ 3 \left(\sin \theta_1 - \frac{k_2 L_3}{k_3 L_2} \cos \theta_1 \right) + L_3 \right\} C_{CD} \dots \right.}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$$

$$\dots + L_3 \left\{ C_{CD} + \left(l_1 - \frac{l}{2} \right) l p \right\} \dots\dots\dots$$

$$\dots + 2A_2 \left(\frac{k_2}{k_3} + 1 \right) C_{CD}$$

$$C_{CD} = \frac{p l^2}{12 l_1^2} (6 l_1^2 - 8 l l_1 + 3 l^2)$$

$$C_{DC} = -\frac{p l^2}{12 l_1^2} (4 l_1 - 3 l)$$

A_1, A_2, B_1, B_2 は、i) の場合と同じ。

② 杭頭せん断力

$$S_{CD} = -\frac{1}{l_1} \left\{ M_{CD} + M_{DC} + \left(l_1 - \frac{l}{2} \right) l p \right\} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} (M_{AB} + M_{BA}) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{DC} = \varphi_C + \psi_1 + C_{DC}$$

$$M_{AB} = k_2 \left(\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \psi_1 \right)$$

$$\varphi_B = -\frac{2(1+k_3)\varphi_C + (1-k_3)\frac{\sin \theta_1}{L_3}\psi_1 + C_{CD}}{k_3}$$

③ 軸力

$$N_{CD} = \frac{S_{CD} \sin \theta_1 - N_{BA}}{\cos \theta_1} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$N_{BA} = -\frac{1}{l_3} (M_{BC} + M_{CB}) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{BC} = k_3 \left(2\varphi_B + \varphi_C - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right)$$

$$M_{CB} = k_3 \left(2\varphi_C + \varphi_B - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right)$$

④ 杭頭の水平変位

$$\delta_k = \psi_1 l_1 \cos \theta_1 \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

iii) 外力モーメント M_0 が作用する場合 (図-18 参照)

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{CD} = 2\varphi_C + \psi_1 \quad (\text{tf} \cdot \text{m})$$

$$M_{BA} = k_2 \left(2\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \psi_1 \right) \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \quad \dots\dots\dots (24)$$

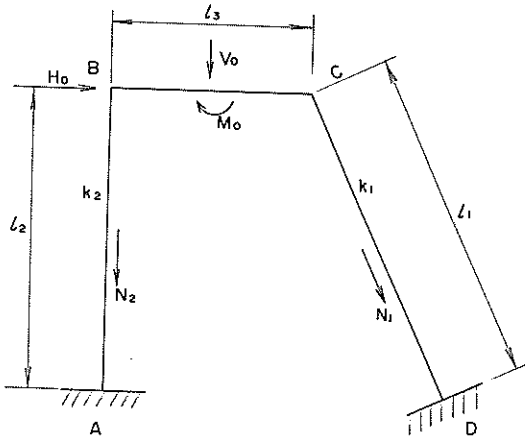


図-18 集中力モーメント

ここに

$$\varphi_C = \frac{-B_2 \{ C_{BC} - 2(\frac{k_2}{k_3} + 1) C_{CB} \} + B_1 \{ 3(\sin \theta_1 \dots \dots - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1) C_{CB} - \sin \theta_1 (C_{BC} + C_{CB} \dots \dots + M_0) \}}{A_1 B_2 - A_2 B_1}$$

$$\varphi_B = \frac{-2(1 - k_3) \varphi_C + (1 - k_3) \frac{\sin \theta_1}{L_3} \phi_1 + C_{CB}}{k_3}$$

$$\phi_1 = \frac{-A \{ C_{BC} - 2(\frac{k_2}{k_3} + 1) C_{CB} \} + A_1 \{ 3(\sin \theta_1 \dots \dots + \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1) C_{CB} - \sin \theta_1 (C_{BC} + C_{CB} \dots \dots + M_0) \}}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$$

$$C_{BC} = \frac{M_0}{4}$$

$$C_{CB} = \frac{M_0}{4}$$

A_1, A_2, B_1, B_2 は、1) の場合と同じ。

② 杭頭せん断力

$$S_{CD} = -\frac{1}{l_1} (M_{CD} + M_{DC}) \quad (tf) \quad \dots \dots (25)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2} (M_{AB} + M_{BA}) \quad (tf)$$

ここに

$$M_{DC} = \varphi_C + \phi_1$$

$$M_{AB} = k_2 \left(\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \phi_1 \right)$$

③ 軸力

$$N_{CD} = \frac{S_{CD} \sin \theta_1 - N_{BA}}{\cos \theta_1} \quad (tf) \quad \dots \dots (26)$$

$$N_{BA} = -\frac{1}{l_3} (M_0 + M_{BC} + M_{CB}) \quad (tf)$$

ここに

$$M_{BC} = k_3 \left(2\varphi_B + \varphi_C - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \phi_1 \right) + C_{BC}$$

$$M_{CB} = k_3 \left(2\varphi_C + \varphi_B - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \phi_1 \right) + C_{CB}$$

④ 杭頭の水平変位

$$\delta_h = \phi_1 l_1 \cos \theta_1 \quad (m) \quad \dots \dots (27)$$

iv) 鉛直外力 V_0 及び水平外力 H_0 が作用する場合

① 杭頭曲げモーメント

$$M_{CD} = 2\varphi_C + \phi_1 \quad (tf \cdot m) \quad \dots \dots (28)$$

$$M_{BA} = k_2 \left(2\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \phi_1 \right) \quad (tf \cdot m)$$

ここに

$$\varphi_C = \frac{-B_1 \{ C_{BC} - 2(\frac{k_2}{k_3} + 1) C_{CB} \} + B_1 \{ 3(\sin \theta_1 \dots \dots - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1) C_{CB} - \sin \theta_1 (C_{BC} + C_{CB} + \frac{l_3}{2} V_0) \dots \dots + H_0 l_3 \cos \theta_1 \}}{A_1 B_2 - A_2 B_2}$$

$$\varphi_B = -\frac{2(1 + k_3) \varphi_C + (1 - k_3) \frac{\sin \theta_1}{L_3} \phi_1 + C_{CB}}{k_3}$$

$$\phi_1 = \frac{-A_2 \{ C_{BC} - 2(\frac{k_2}{k_3} + 1) C_{CB} \} + A_1 \{ 3(\sin \theta_1 \dots \dots - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3}{L_2} \cos \theta_1) C_{CB} - \sin \theta_1 (C_{BC} + C_{CB} \dots \dots + \frac{l_3}{2} V_0) + H_0 l_3 \cos \theta_1 \}}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$$

$$C_{BC} = -\frac{V_0 l_3}{8}$$

$$C_{CB} = \frac{V_0 l_3}{8}$$

A_1, A_2, B_1, B_2 は、i)の場合と同じ。

② 杭頭せん断力

$$S_{CD} = -\frac{1}{l_1}(M_{CD} + M_{DC}) \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots (29)$$

$$S_{BA} = -\frac{1}{l_2}(M_{AB} + M_{BA}) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{DC} = \varphi_C + \psi_1$$

$$M_{AB} = k_2 \left(\varphi_B + \frac{\cos \theta_1}{L_2} \psi_1 \right)$$

③ 軸力

$$N_{CD} = \frac{S_{CD} \sin \theta_1 - N_{BA} + V_0}{\cos \theta_1} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots (30)$$

$$N_{BA} = -\frac{1}{l_3} \left(M_{BC} + M_{CB} - \frac{l_3}{2} V_0 \right) \quad (\text{tf})$$

ここに

$$M_{BC} = k_3 \left(2\varphi_B + \varphi_C - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right) + C_{BC}$$

$$M_{CB} = k_3 \left(2\varphi_C + \varphi_B - \frac{\sin \theta_1}{L_3} \psi_1 \right) + C_{CB}$$

④ 杭頭の水平変位

$$\delta_h = \psi_1 l_1 \cos \theta_1 \quad (\text{m}) \quad \dots\dots (31)$$

v) 杭軸方向外力 N_1, N_2 が作用する場合

① 軸力

$$\begin{aligned} N_{CD} &= N_1 \quad (\text{tf}) \\ N_{BA} &= N_2 \quad (\text{tf}) \end{aligned} \quad \dots\dots (32)$$

c) 杭中間部の曲げモーメント、せん断力荷重状態 i) ~ iv) については、(5)参照。

(4) 二重カーテンタイプ

a) 解析モデルと計算方法 (図-19 参照)

i) 杭頭曲げモーメント、杭頭せん断力、軸力、杭頭の水平変位

仮想海底面から $1/\beta$ の点を仮想固定点としたラーメン構造として求める。

ii) 杭中間部の曲げモーメント、せん断力 (5)参照。

(5) チャンの方法による杭中間部の曲げモーメント、せん断力

a) 解析モデル (図-20 参照)

仮想固定点法に基づいてラーメンの解析を行っているが、この方法では、固定点の曲げモーメントが過大に計算されることが知られている。従って、杭中間部の曲げモーメント、せん断力については、ラーメン計算により求めた杭頭曲げモーメント、せん断力を外力として、チャ

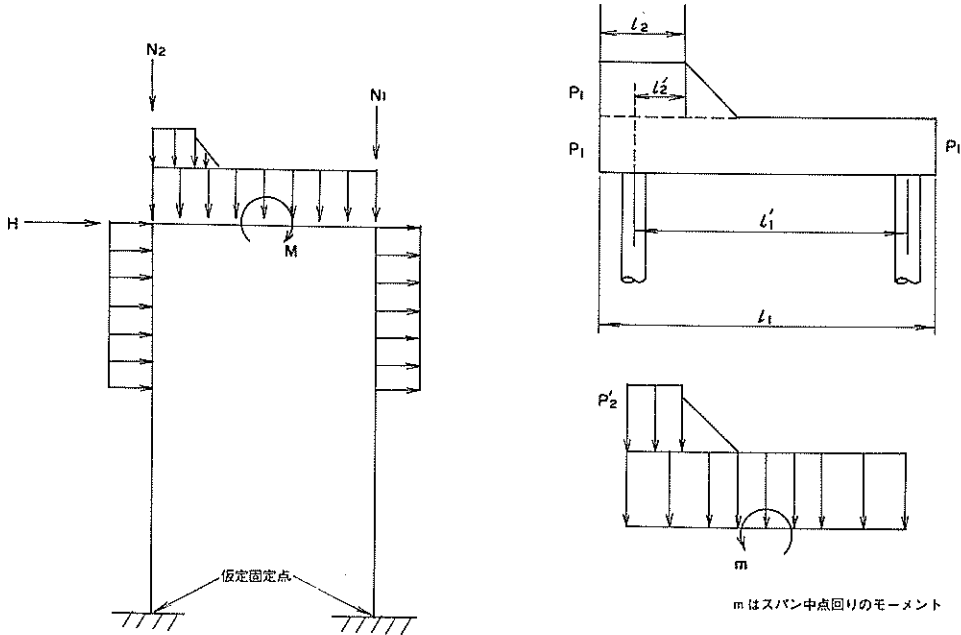


図-19 二重カーテンに作用する荷重

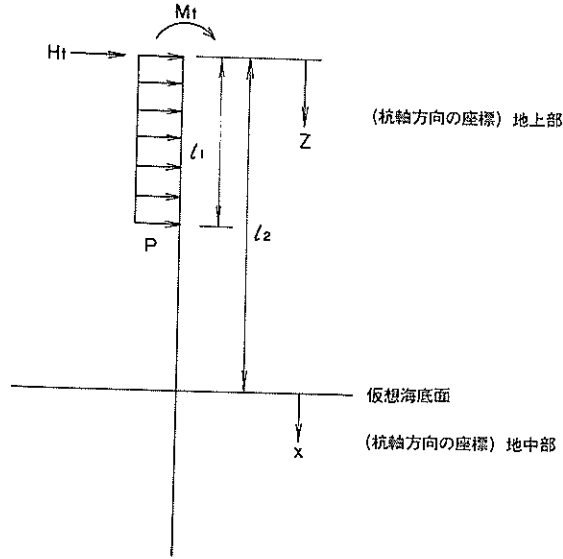


図-20 解析モデル

の方法による杭の構抵抗の計算より求める。

① 地上部曲げモーメント (M_z)

$$M_z = -M_t - H_t z - R_{(z)} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \quad \dots\dots (33)$$

ここに

- M_t ; 杭頭モーメント (tf・m)
- H_t ; 杭頭せん断力 (tf)
- z ; 杭頭を原点とした杭軸方向の座標 (m)
- $R_{(z)}$; 荷重係数 R (tf・m)

$z \leq l_1$ の場合

$$R_{(z)} = \frac{1}{2} p z^2$$

$l_1 < z \leq l_2$ の場合

$$R_{(z)} = \frac{1}{2} p \{ z^2 - (z - l_1)^2 \}$$

p ; 杭軸方向 1 m 当りの荷重強度 (tf/m)

② 地上部せん断力 (S_z)

$$S_z = -H_t - Q_{(z)} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots (34)$$

ここに

$Q_{(z)}$; 荷重係数 Q (tf)

$z \leq l_1$ の場合

$$Q_{(z)} = p z$$

$l_1 < z \leq l_2$ の場合

$$Q_{(z)} = p l_1$$

③ 地中部曲げモーメント (M_z)

$$M_z = -\frac{H'}{\beta} e^{-\beta x} \{ (1 + \beta h') \sin \beta x + \beta h' \cos \beta x \} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \quad \dots\dots (35)$$

ここに

H' ; 仮想海底面より上の軸直角方向力の合力 (tf)

$$H' = H_t + p l_1$$

h' ; H' の見掛けの作用高 (m)

$$h' = \frac{M'}{H'}$$

M' ; 仮想海底面での曲げモーメント (t・m)

$$M' = M_t + H_t l_2 + \frac{1}{2} p \{ z^2 - (z - l_1)^2 \}$$

x ; 仮想地表面を原点とした杭軸方向の座標 (m)

$$\beta ; \beta = \sqrt{\frac{k h B}{4 E I}} \quad (\text{m}^{-1})$$

④ 地中部のせん断力 (S_z)

$$S_z = -H' e^{-\beta x} \{ \cos \beta x - (1 + 2\beta h') \sin \beta x \} \quad (\text{tf}) \quad \dots\dots (36)$$

⑤ 地中部の最大曲げモーメント (M_{\max})

$$M_{\max} = -\frac{H'}{2\beta} \sqrt{(1 + 2\beta h')^2 + 1} \cdot e^{-\beta l_m} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}) \quad \dots\dots (37)$$

⑥ 地中部の最大曲げモーメントの生じる深さ (l_m)

$$l_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1 + 2\beta h'} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots (38)$$

3.2 杭の応力度

(1) 杭の応力度

応力度は、式(39)より求めるものとする。

$$\sigma = \frac{p}{A} \pm \frac{M}{z} \quad \dots\dots\dots (39)$$

ここに

- A ; 杭の断面積 (腐食を考慮) (cm²)
- p ; 軸力 (kgf)
- z ; 杭の断面係数 (腐食を考慮) (cm³)
- M ; 曲げモーメント (kgf・cm)

(2) せん断応力度の検討

① 鋼管杭の場合

$$\tau = \frac{2S}{A} \leq \tau_a \quad \dots\dots\dots (40)$$

② H型鋼杭の場合

H型鋼杭の場合は、ウェブがせん断力の大部分を受け持つので、せん断応力度は式(41)で求める。(図-21参照)

$$\tau = \frac{S}{t_1(H-2t_2)} \leq \tau_a \quad \dots\dots\dots (41)$$

ここに

- τ ; せん断応力度 (kgf/cm²)
- S ; せん断力 (kgf)
- A ; 杭の断面積 (cm²)
- H ; H型鋼の高さ (cm)
- t₁ ; ウェブの厚さ (cm)
- t₂ ; フランジの厚さ (cm)

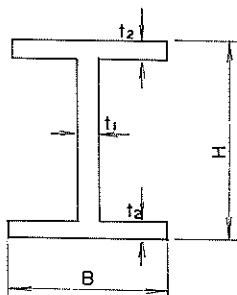


図-21 H型鋼杭

3.3 杭の根入長

杭の根入長は、横抵抗及び鉛直支持力を考慮して決定する。

(1) 横抵抗に対して必要な根入長

杭の横抵抗に対して必要な根入長は、港研方式及びチャンの方法より求めるものとした。根入長は、腐食前と腐食後では、腐食前の方が剛性が大きいため長くなる。

したがって、根入長の計算においては、腐食前の断面諸元を用いる。

a) 直杭タイプ

i) 港研方式より求める場合、根入長は仮想海底面以下1.5 l_{m1}とする。

ii) チャンの方法より求める場合、根入長は式(42)より求める。

$$L = \frac{\alpha}{\beta} \quad \dots\dots\dots (42)$$

ここに

- L ; 杭の必要根入長 (cm)
- α ; 根入長に関する定数で入力データで指定できるものとする。ただし、αの値が入力されない場合は、標準値としてα=3が自動的にセットされる。

$$\beta ; \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot B}{4EI}} \quad (\text{cm}^{-1})$$

b) 組杭タイプ

i) 軸方向支持力のみで抵抗するとして計算する場合は、杭の横抵抗に対する根入長は考慮しない。

ii) 杭の軸直角方向支持力を考慮して計算する場合は、α/βを根入長とする。αの値の入力がない場合はα=3として計算する。

c) ラーメンタイプ及び二重カーテンタイプ

根入長は、α/βとする。αの値の入力がない場合はα=3として計算する。

(2) 支持力に対して必要な根入長

支持力に対する根入長は、杭の横抵抗に対して必要な根入長を初期値として、式(44)から(46)を満足するまで伸ばす。

地盤が水に飽和された細砂、シルト質砂でかつN値が15より大きい場合、計算のN値は、式(43)に従って行う。ただし、この補正は、プログラム内で行わないで、補正後のN値を入力する。

$$N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15) \quad \dots\dots\dots (43)$$

ここに

N' ; 実測されたN値

ただし、付着力については、表-5より求める。

表-5 平均付着力の算定式

付着力 C	付着力 \bar{C}_a (tf/m ²)
$0 < C \leq 3.7$	$\bar{C}_a = \frac{3.4}{3.7} \times C$
$3.7 < C \leq 7.3$	$\bar{C}_a = \frac{1.5}{3.6} (C - 3.7) + 3.4$
$7.3 < C \leq 14.6$	$\bar{C}_a = \frac{1}{7.3} (C - 7.3) + 4.9$
$14.6 < C$	$\bar{C}_a = 5.9$

a) 先端閉塞率

杭の先端閉塞効果を考慮する場合は、次の図-22より閉塞率 α を求める。極限抵抗の低減を行わない場合は、閉塞率 α を1.0とする。

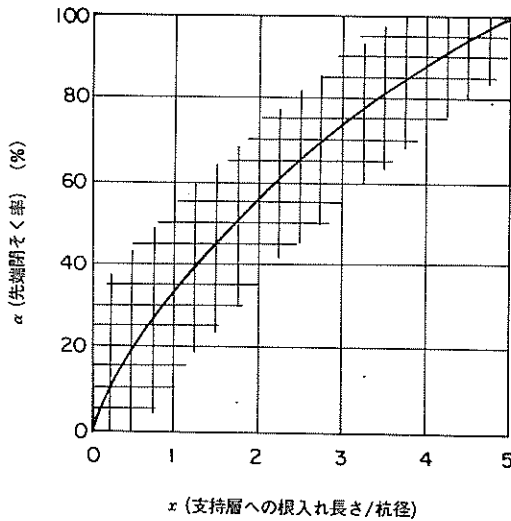


図-22 支持層への根入れ長さ先端閉塞率

b) 杭の許容支持力

杭の許容支持力は、式(44)から(46)によって行う。

i) 押込力に対して

$$R_{ac} = \frac{1}{F} (40 \cdot N \cdot \alpha \cdot A_p + \frac{\bar{N}}{5} \cdot A_s + \Sigma \bar{C}_a \cdot A_c) = R_u / F \quad \dots\dots\dots (44)$$

杭先端地盤が砂質土

$$R_{ac} = \frac{1}{F} (q \cdot C_p \cdot \alpha \cdot A_p + \frac{\bar{N}}{5} \cdot A_s + \Sigma \bar{C}_a \cdot A_c) = R_u / F \quad \dots\dots\dots (45)$$

杭先端地盤が粘性土

ii) 引抜き力に対して

$$R_{at} = \frac{1}{F} (\frac{\bar{N}}{5} \cdot A_s + \Sigma \bar{C}_a \cdot A_c) = R_u / F \quad \dots\dots (46)$$

ここに

R_{ac} ; 押込みに対する許容支持力 (tf)

R_{at} ; 引抜きに対する許容支持力 (tf)

α ; 閉塞率

A_p ; 杭の先端面積 (m²)

A_s ; 砂質土と接する杭の表面積 (m²)

A_c ; 粘性土と接する杭の表面積 (m²)

N ; 杭の先端地盤の N 値

\bar{N} ; 砂層の杭根入全長に対する平均の N 値

C_p ; 杭の先端位置の粘着力 (tf/m²)

\bar{C}_a ; 各粘土層の中央での粘着力から算定する平均の付着力 (tf/m²)

R_u ; 杭の極限支持力 (tf)

c) 杭の支持力安全率

安全率については、表-6の通りとする。杭先端が砂地盤の場合は、支持杭として、先端が粘性土地盤の場合は、摩擦杭として取扱う。

表-6 支持力安全率の自動セット値

	常時扱い	異常時扱い	
		支持杭	摩擦杭
押込力に対する安全率	2.5	1.5	2.0
引抜き力に対する安全率	3.0	2.5	

3.4 ネガティブフリクション

ネガティブフリクションの検討は、直杭形式の場合は港外より常時の波圧の山のときに検討をし、その他の形式については、港外、港内より常時の波圧の山のときに検討を行うこととする。

a) ネガティブフリクション

軸方向許容支持力

$$R_a + R_{nt, \max} \leq \frac{1}{1.2} \times R_p \quad \dots\dots\dots (47)$$

$$R_a + R_{nt, \max} \leq \sigma_f \cdot A_s$$

ここに

R_a ; 軸方向許容支持力 (tf)

R_p ; 杭の先端支持力 (極限值) (tf)

N ; 杭先端地盤の N 値

A_p ; 杭の先端面積 (m²)

L_{s1} ; 杭が支持地盤に侵入している長さ (m)

N_{s1} ; L_{s1} 区間での平均の N 値
 σ_f ; 杭材降伏点圧縮応力度, または長期許容圧縮応力度の 1.5 倍 (tf/n^2)
 A_e ; 杭の有効断面積 (m^2)
 $R_p = 40 \cdot N \cdot A_p + \frac{\bar{N}_{s1} \cdot L_{s1}}{5} \cdot \phi$
 $R_{nf, max} = (\sum \frac{N_{s2} \cdot L_{s2}}{5} + \sum \frac{q_u \cdot L_c}{2}) \cdot \phi$

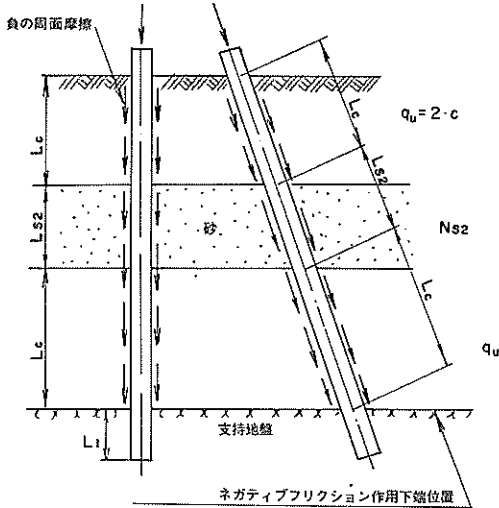


図-23 ネガティブフリクション

ここに

$R_{nf, max}$; 負の周面摩擦の最大値 (tf)
 L_{s2} ; 杭の砂層中の長さ (m)
 L_c ; 杭の粘土層中の長さ (m)
 N_{s2} ; 砂層の平均 N 値
 q_u ; 粘土層中の平均一軸圧縮強度 (tf/m^2)
 ϕ ; 杭の周長 (m)

b) 圧密沈下による斜杭の曲げ応力度

i) 計算モデル

図-24 に示す計算モデルを想定する。

杭天端の条件としてラーメン計算から求めたたわみ, たわみ角を与える。杭下端の条件としてたわみ, たわみ角ゼロを与える。

ii) 計算方法

港研報告第17巻第4号“地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに対する実験的研究”に示されている方法による。この方法は、地盤をWinKler地盤(定数 k のスプリングの集合で表わされる地盤)とし、杭と土の軸直角方向の相対移動に比例した地盤反力が生じるものとして圧密

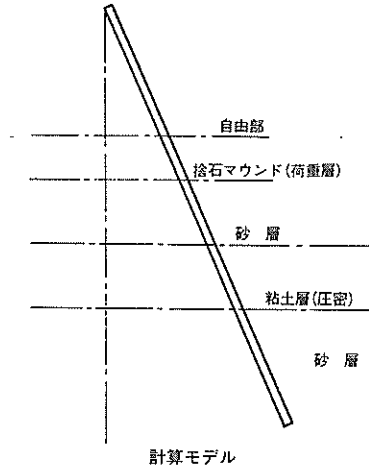


図-24 WinKler地盤

沈下による斜杭の曲げモーメント等を求める方法である。

3.5 継ぎ杭

継手の位置は、仮想海底面より $2/\beta$ の点とする。検討に必要な入力条件としては、上杭と下杭の肉厚の許容差, 下杭の許容最小長さを入力すればよい。ただし、H型鋼杭の場合の下杭は、表-7 に示した同一グループ内より選定する。

表-7 H型鋼杭寸法(高さ×幅)のグループ分け

グループ 1	200 × 200	200 × 204	208 × 202						
2	244 × 252	248 × 249	250 × 250	250 × 255					
3	294 × 302	298 × 299	300 × 300	300 × 305	304 × 301				
4	338 × 351	344 × 348	344 × 354	350 × 350	350 × 357	356 × 352			
5	388 × 402	394 × 398	394 × 405	400 × 400	400 × 408	406 × 403	414 × 405	428 × 407	458 × 417
							498 × 432		

3.6 横方向地盤反力係数

a) 斜杭に用いる横方向地盤反力係数は、杭の傾斜角に応じて、図-25 により補正した値を用いる。プログラム内では表-8 により求めた値を求めている。

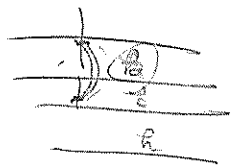


表-8 斜杭の横方向地盤反力係数算定式

斜ぐいの傾き(度)	
$-30^\circ < \theta \leq -20^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.051\theta + 0.71)$
$-20^\circ < \theta \leq -10^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.039\theta + 0.95)$
$-10^\circ < \theta < 0^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.034\theta + 1.00)$
$0^\circ < \theta < 10^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.026\theta + 1.00)$
$10^\circ \leq \theta < 20^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.024\theta + 0.98)$
$20^\circ \leq \theta < 30^\circ$	$k_H' = Kk_H'$ $= k_H \times (-0.017\theta + 0.84)$

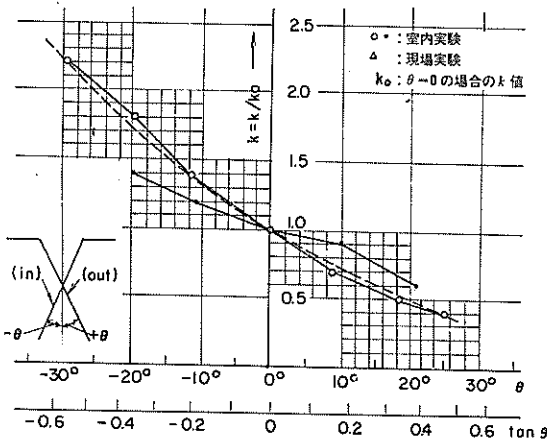


図-25 杭の傾斜角とkとの関係

b) 互層地盤の横方向地盤反力係数 (k 値)

砂層と粘土層の互層地盤に対しては、各層の地盤強度を加味した換算k値を用いる。

4. システムの評価

4.1 項目

第一にカーテン式防波堤の断面決定の大きな要素としての波の条件(波高、水深、波高伝達率)を変えての検討、第二に地盤の条件(内部摩擦角、N値、地盤反力係数、震度)を変えての検討を考慮することとする。

波の条件については、水深、波高伝達率をパラメータとして波高、地盤条件については、設計震度をパラメータとして地盤強度、と断面係数、根入長の関係を求める

こととする。

4.2 設計条件

各検討項目について以下の通り各設計条件を設定し検討を行った。

(1) 波の条件における検討

換算沖波波高と断面係数及び根入長の関係。

i) 波高及び周期

波高は、換算沖波波高(H_0')とし、 $H_0' = 1.0 \sim 3.0$ m とする。周期(T)は、 $T = 6.0 \sim 8.0$ 秒とした。検討ケースは、

$$H_0' = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ m}$$

$$T = 6.0, 7.0, 8.0 \text{ 秒}$$

の3ケースである。波については、港外側からの常時扱の波について検討する。

ii) 設計水深

設計水深(h)は、4.0~8.0 mの範囲とした。検討ケースは、

$$h = 4.0, 6.0, 8.0 \text{ mの3ケースである。}$$

iii) 潮位

潮位は、H.H.W.L. = 2.0 m, H.W.L. = 2.0 m, L.W.L. = 0.0 mとした。本システムでは、L.W.L. からH.H.W.L. まで水位を10 cmピッチで変化させているが本検討においては、検討水位は、H.W.L. に固定して行うものとする。

iv) 防波堤天端高

天端高(R)は、2.2の図-5及び図-6より計算された値を用いるものとする。

v) 波圧公式

波圧公式は、合田式を用いるものとする。

vi) 震度は0.0としている。

vii) 上載荷重はないものとしている。

viii) 船舶接岸力及びけん引力は考えていない。

ix) 波高伝達率(K_T)は、 $K_T = 0.3, 0.4, 0.5$ としている。

x) その他

地盤条件は、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ の砂地盤とし、港研方式O型地盤で横抵抗定数は、 $k_c = 2.1 \text{ kg/cm}^{2.5}$ とする。海底勾配は1/100とする。杭は、ミリサイズ鋼管杭を用いることとし材質は、STK-41とする。腐食代は、考慮しないものとし許容変位量は、10 cmとする。

(2) 地盤の条件における検討

地盤条件と断面係数及び根入長の関係

i) 波高及び周期

波高は、換算沖波波高(H_0')とし、 $H_0' = 2.0$ m, 周期(T)は、 $T = 7.0$ 秒としている。

ii) 設計水深

設計水深(h)は、 $h = 6.0$ mとしている。

iii) 潮位

潮位は、H.H.W.L. = 2.0 m, H.W.L. = 2.0 m, L.W.L. = 0.0 mとしている。

iv) 防波堤天端高

天端高(R)は、(1)のiv)と同様である。

v) 波圧公式

波圧式は、合田式を用いるものとする。

vi) 上載荷重は考えていない。

vii) 船舶接岸力及びけん引力は考えていない。

viii) 波高伝達率(K_T) $K_T = 0.4$ としている。

ix) 地盤強度

砂質地盤

内部摩擦角 $\phi = 25.0^\circ, 30.0^\circ, 35.0^\circ, 40.0^\circ$

N 値 $N = 5.0, 10.0, 20.0, 30.0$

港研方式 $k_e = 0.7, 2.1, 3.2, 4.1$

チャンの方法 $k_a = 0.8, 1.5, 3.0, 4.5$

の4ケースである。

(海底勾配 1/100とする。)

4.3 結果

(1) 波の条件における検討

換算沖波波高と断面係数及び根入長の関係

a) 直杭形式

図-26・図-27に直杭の場合の波高、水深の変化による断面係数、根入れの計算結果を示す。断面係数及び根入れとも外力条件がきびしくなれば、それぞれ大きく、あるいは、深くなっているが、波高伝達率の影響は波高、水深の影響に比べてそれほど大きくない。

$H_0' = 3.0$ m, 水深 8.0 m, 波高伝達率 0.3 の場合は、指定した最大径、肉厚(1500.0 mm, 25.0 mm)でも許容応力度を満足しないため、図にはない。

b) 組杭形式

図-28から図-31に組杭の場合の波高、水深の変化による断面係数及び根入長の計算結果を示す。組杭は、その構造上直杭に比べて杭断面は、かなり小さな所で決っている。港内側の杭については、直接波力がかからないため杭断面は、港外側の杭に比べて断面係数は小さくなっている。根入長は、港内・外を比較した場合、港内側がかなり大きくなっている。これは、港外側は、引き抜き力、港内側は、押込力が作用するが上部工及び杭自重により引き抜き力が押込力に比べてかなり小さくなっているためである。

c) ラーメン形式

図-32～図-35にラーメン形式の場合の波高・水

深の変化による断面係数及び根入長の計算結果を示す。

直杭、組杭の場合も同様であるが、波高伝達率の影響は、水深・波高に比較してそれほど大きくない。これは、法線方向の杭間隔を 2.0 m としており、カーテンでふさがれる杭と杭のすき間が杭径の 1～2 倍程度であり、波高伝達率の変化によるカーテン高さの変化が波圧合力の増大に対してそれほど大きくひびかないためである。

d) 二重カーテン形式

図-36～図-39に二重カーテンタイプの場合の波高、水深の変化による断面係数及び根入長の計算結果を示す。

この形式の場合、波高伝達率による天端高、カーテン深さの検討は行っていない。他の形式と同様、断面係数、根入長とも外力条件がきびしくなれば、それぞれ大きくあるいは深くなっている。根入長も他と同様港外側が短かく、港内側が長くなっている。

(2) 地盤条件による検討

地盤強度と断面係数及び根入長の関係

a) 直杭形式

図-40・図-41に直杭形式の場合の地盤条件による断面係数及び根入長の計算結果を示す。断面係数、根入長とも震度による変化は見られない。これは、すべて波の方で断面及び根入長が決まっているためである。直杭形式の場合、本検討の条件範囲では、地震時の影響は、波に比較して小さいといえる。地盤条件は、内部摩擦角が 30° 以上では、その影響は非常に小さいが内部摩擦角が 25° の場合、根入が極端に長くなっている。

b) 組杭形式

図-42～図-45に組杭形式の場合の地盤条件の変化による断面係数及び根入長の計算結果を示す。

港内側杭については、地盤条件によらず断面は、最小径、肉厚(600.0 mm, 7 mm)で決まっており、直杭の場合と同様、震度の影響は、見られない。また、根入長についても内部摩擦角 25° で極端に長くなる傾向が見られる。

港外側の杭については、根入長で震度の影響が出ている。これは波荷重に対しては、港外側からの波を対象としているが、地震力は、港内側からも考慮されるため、波荷重による引き抜き力により決定する根入長よりも、港内側からの地震力の押し込み力による根入長の方が長くなることによる。

c) ラーメン形式

図-46～図-49にラーメン形式の場合の地盤条件の変化による断面係数及び根入長の変化の計算結果を示す。

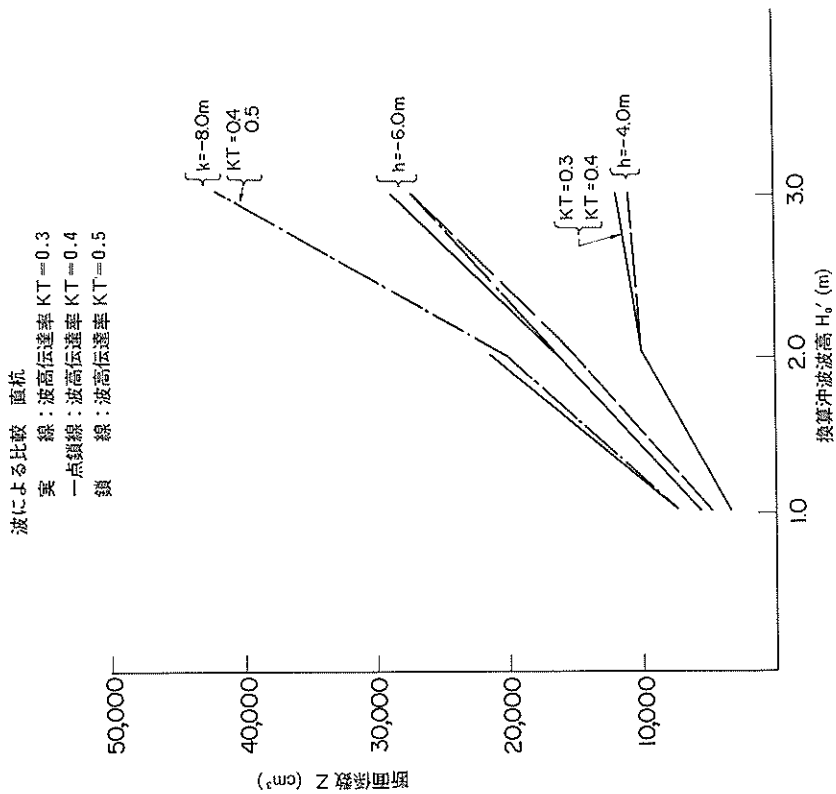
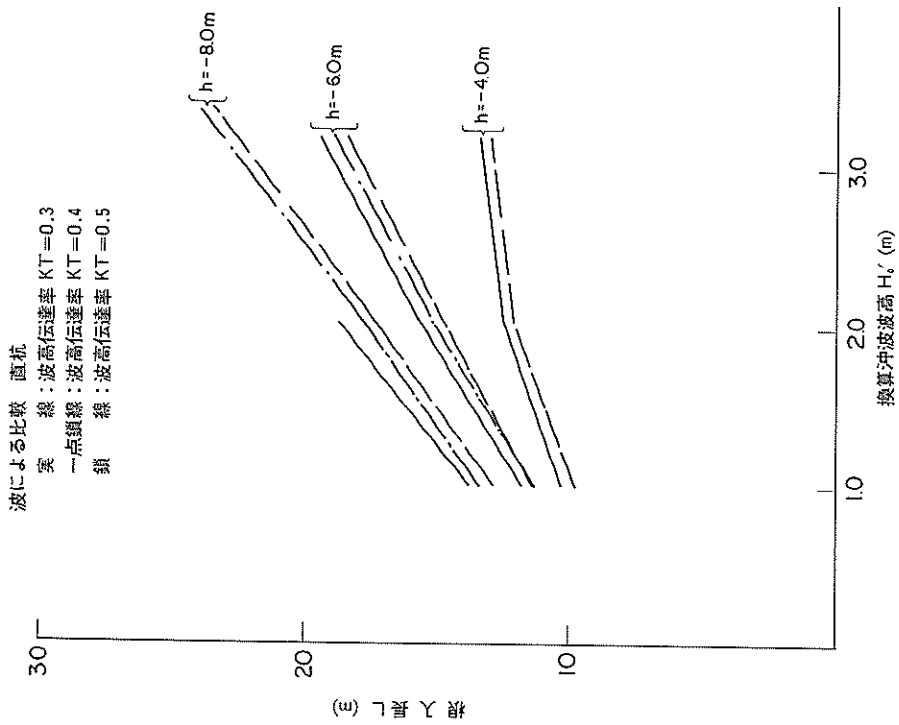
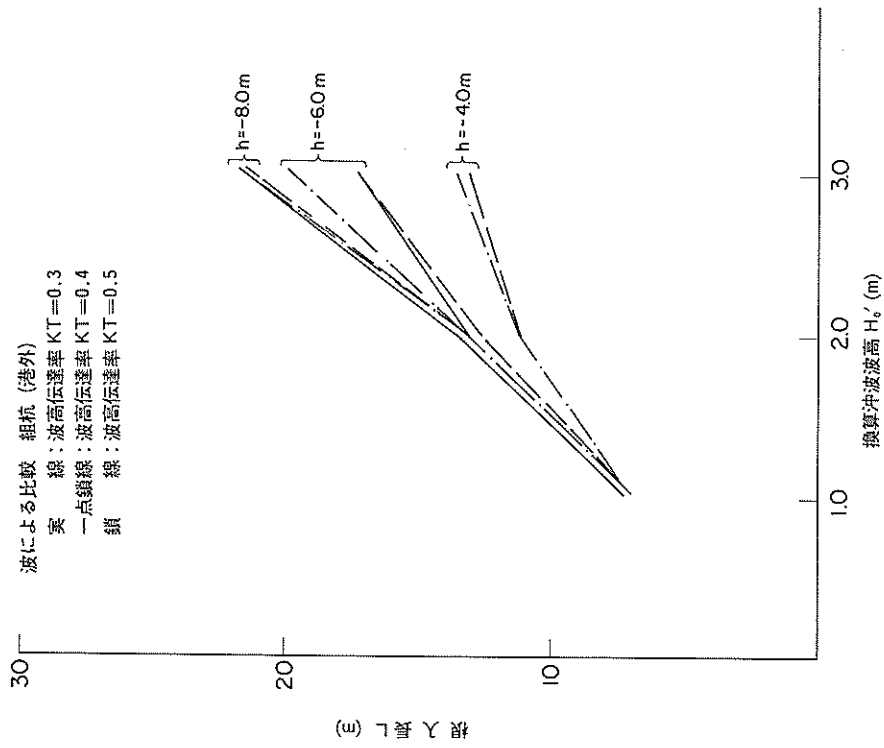
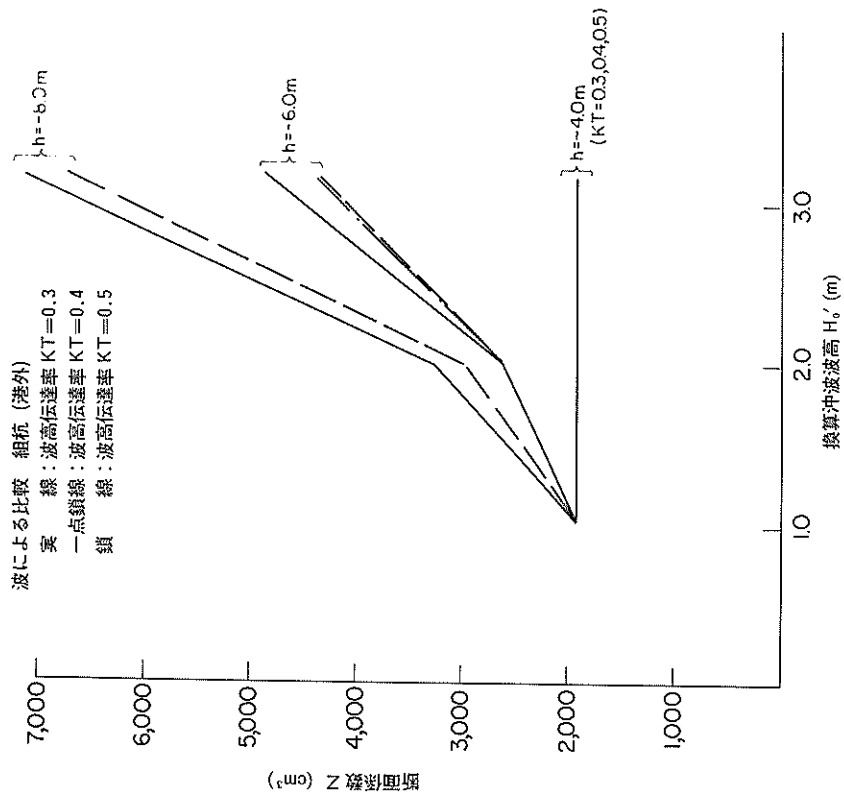


図-27 換算沖波波高と根入長

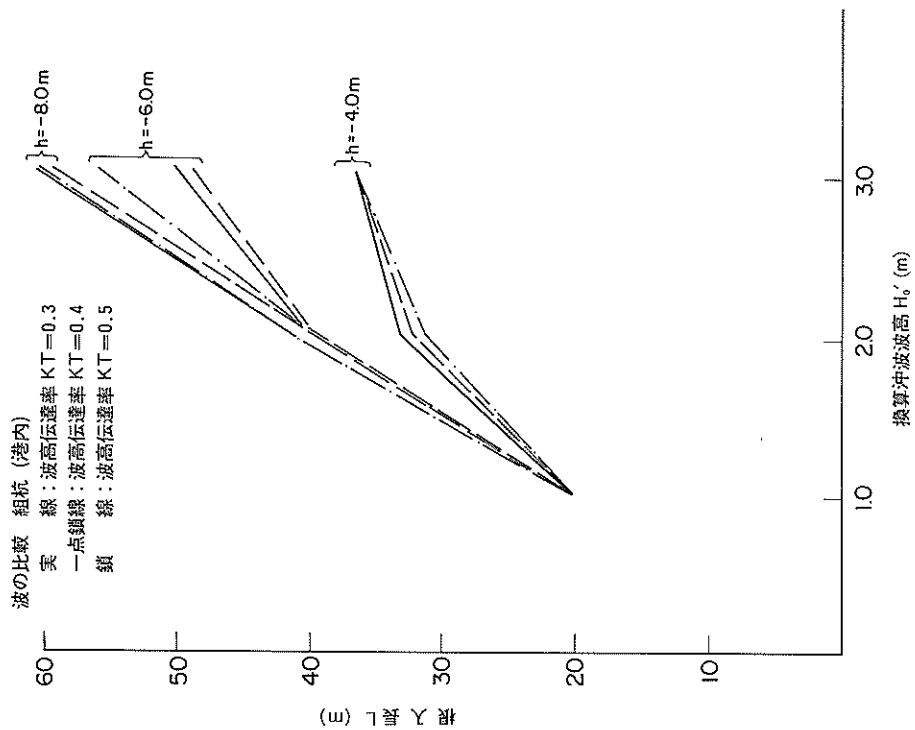
図-26 換算沖波波高と断面係数



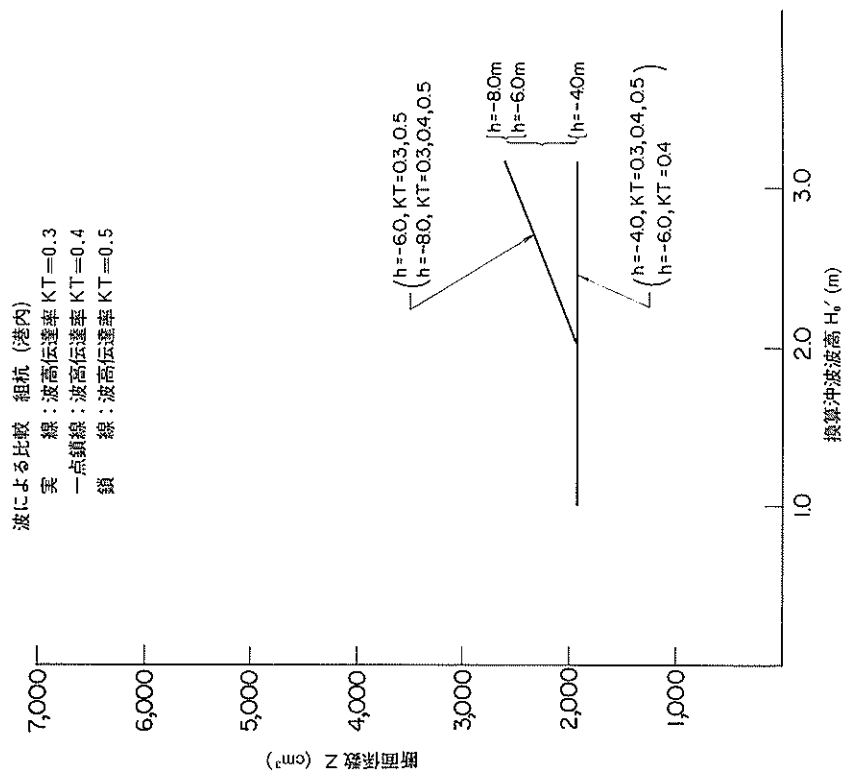
図一 29 換算沖波高と根入長



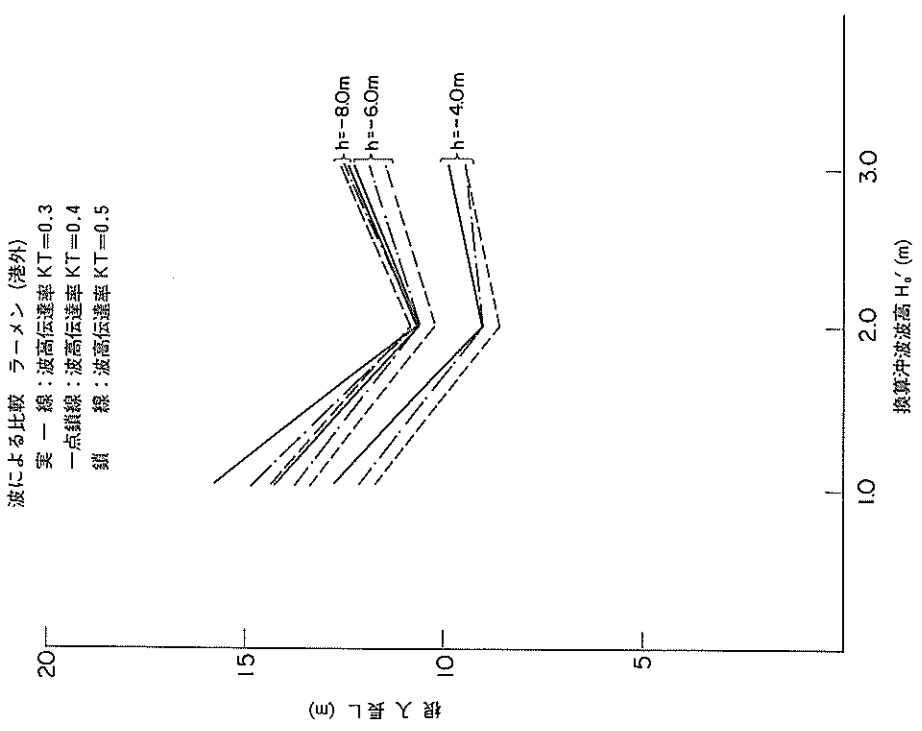
図一 28 換算沖波高と断面係数



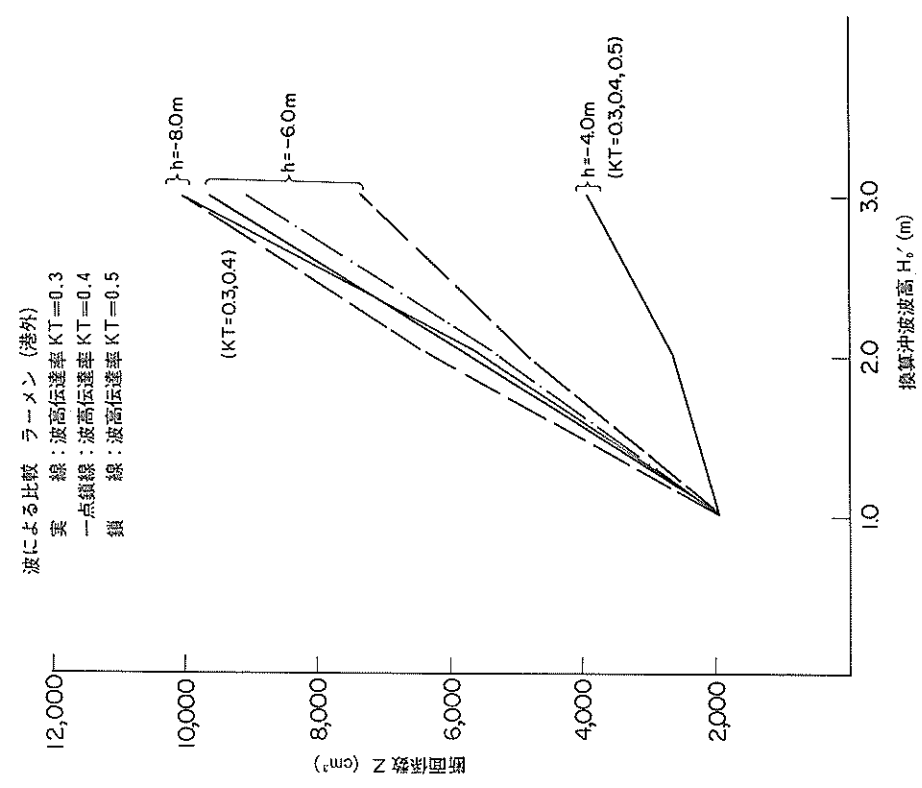
図一三十一 換算沖波波高と根入長



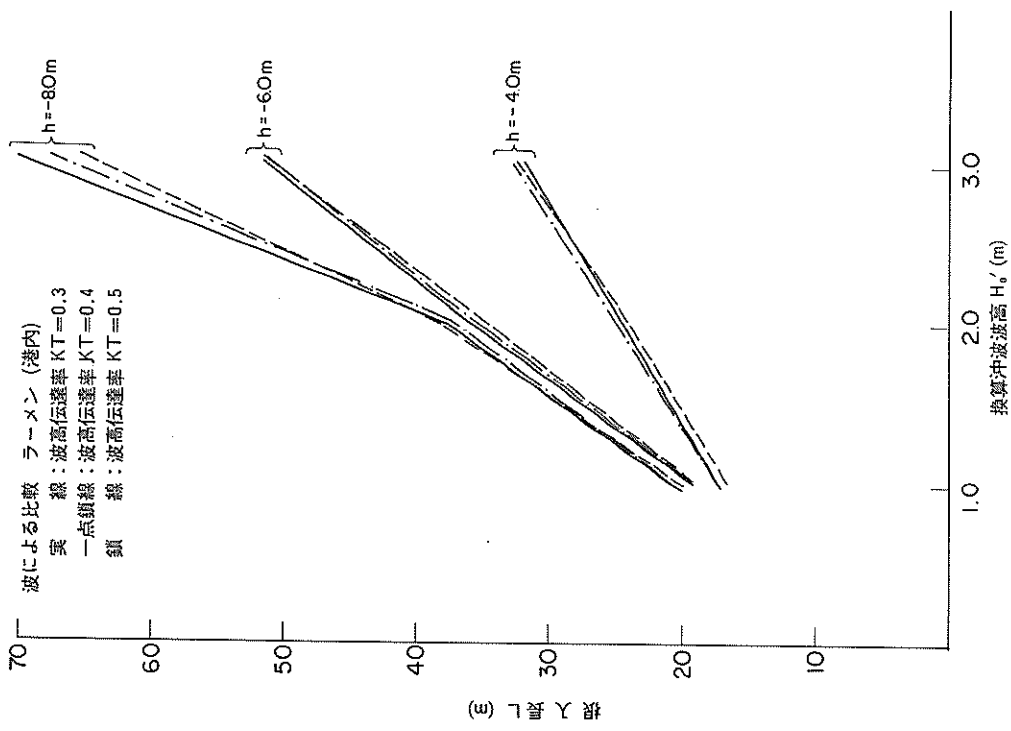
図一三〇 換算沖波波高と断面係数



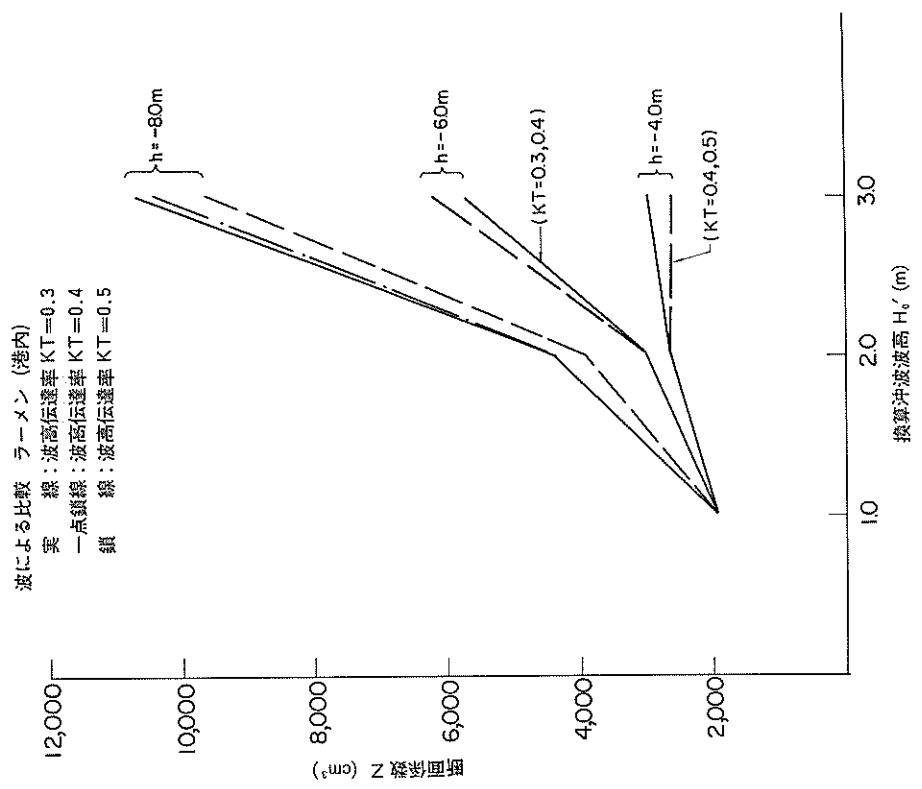
図一33 換算沖波波高と根入長



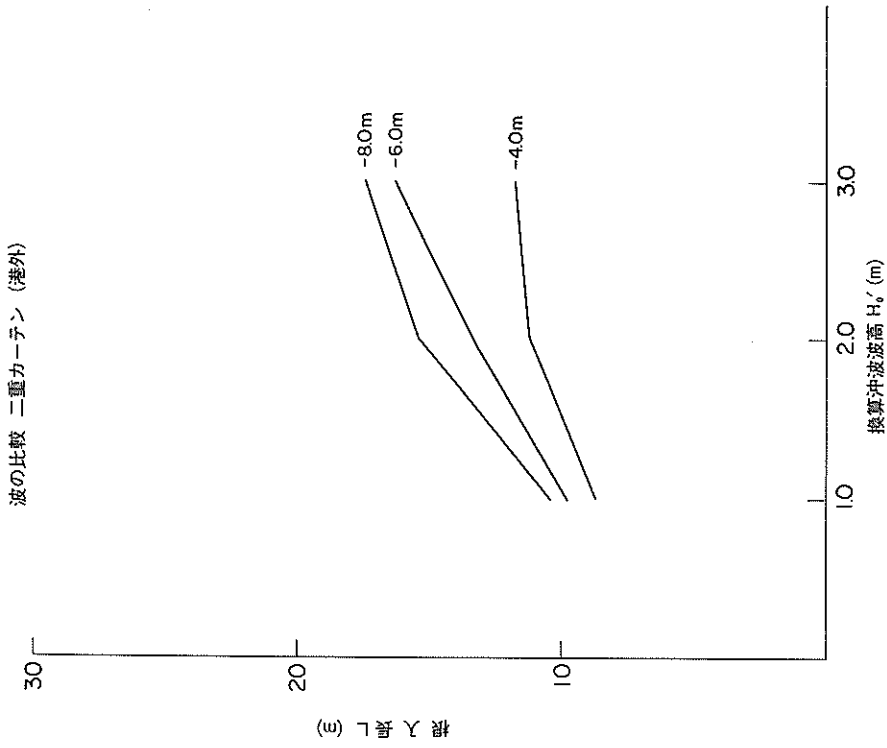
図一32 換算沖波波高と断面係数



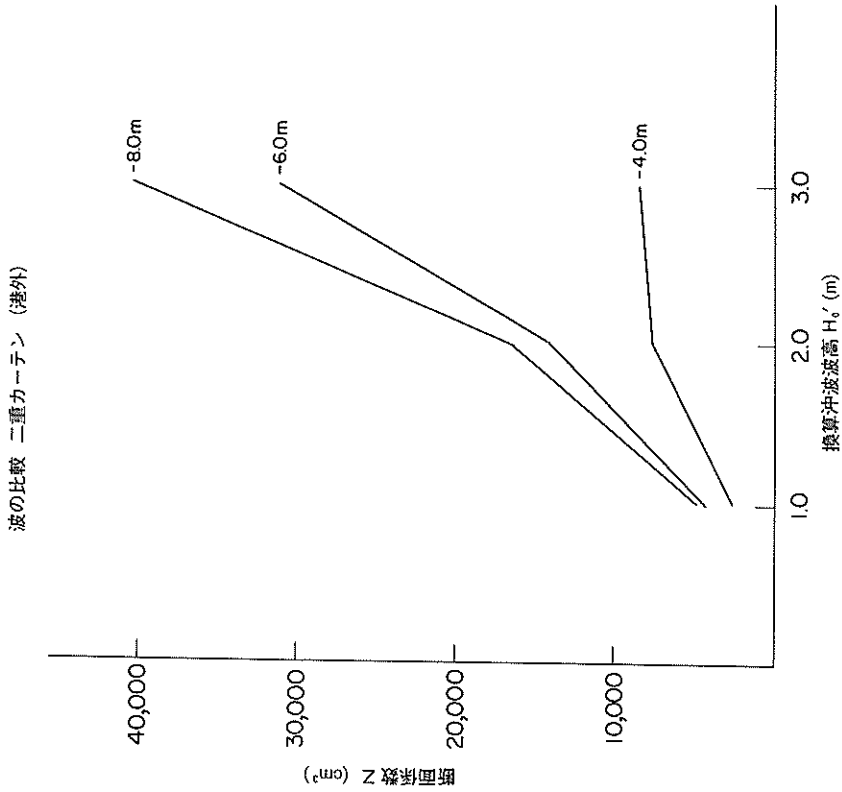
図一35 換算沖波波高と挿入長



図一34 換算沖波波高と断面係数



図一 37 換算沖波波高と挿入長



図一 36 換算沖波波高と断面係数

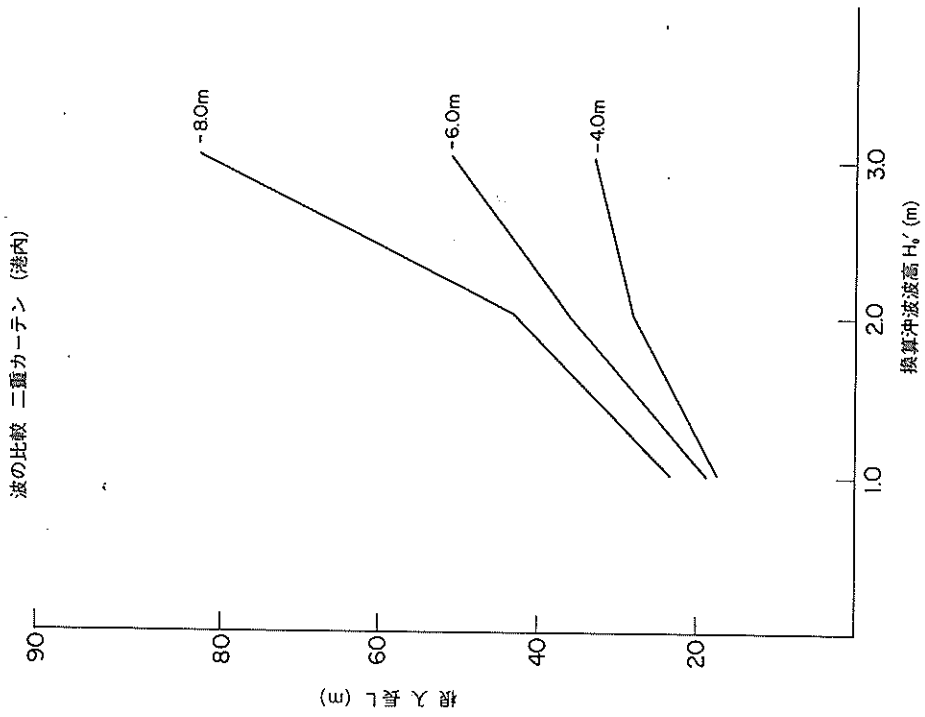


図-39 換算沖波波高と根入長

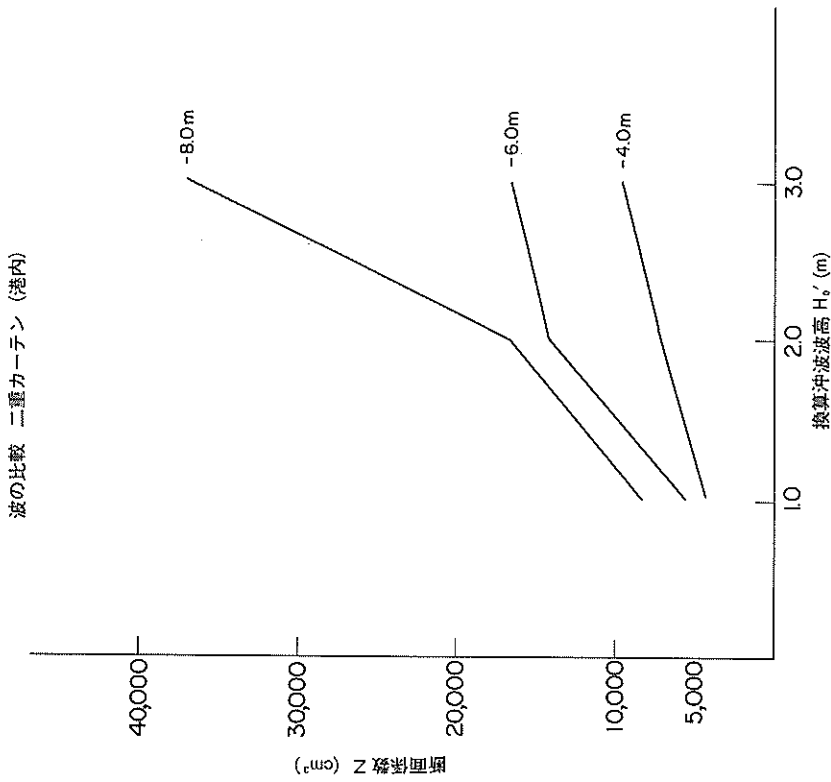


図-38 換算沖波波高と断面係数

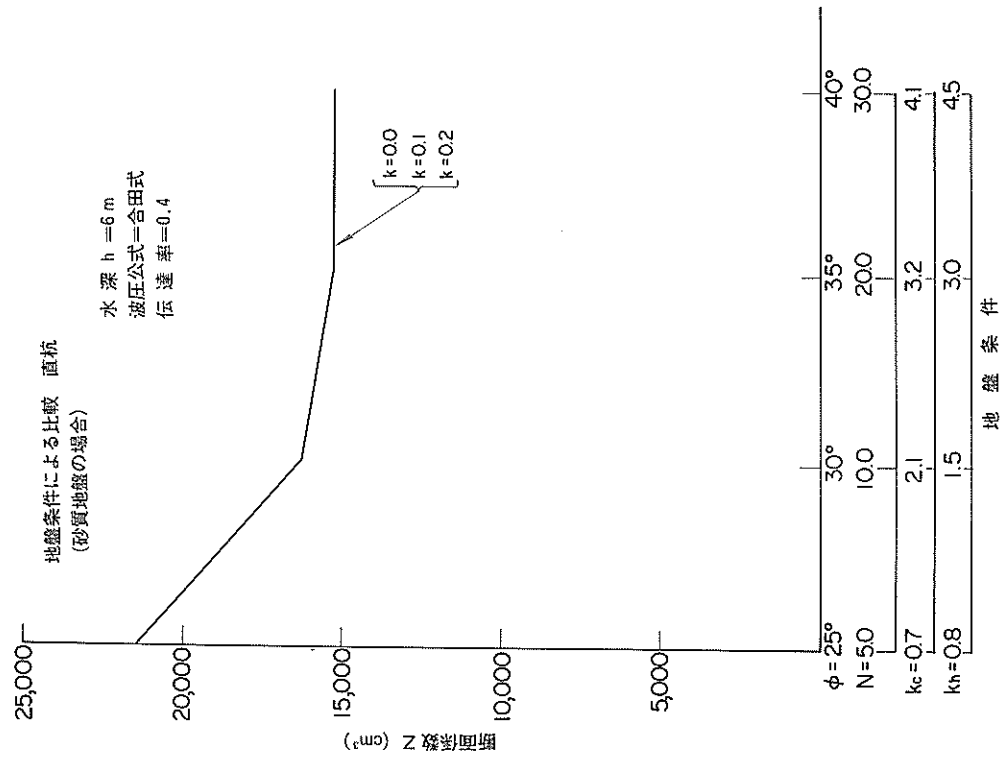


図-40 地盤条件と断面係数

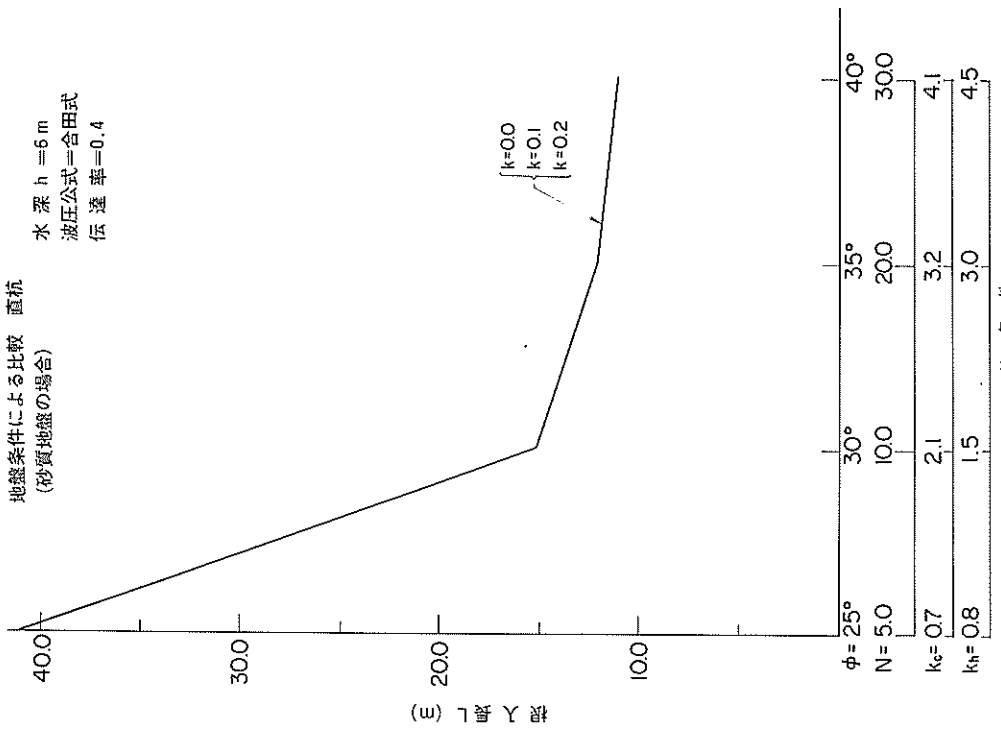


図-41 地盤条件と挿入長さ

地盤条件による比較 組杭 (港外)
(砂質地盤の場合)

水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4 m
 実線 = $k = 0.0$
 一点鎖線 = $k = 0.1$
 鎖線 = $k = 0.2$

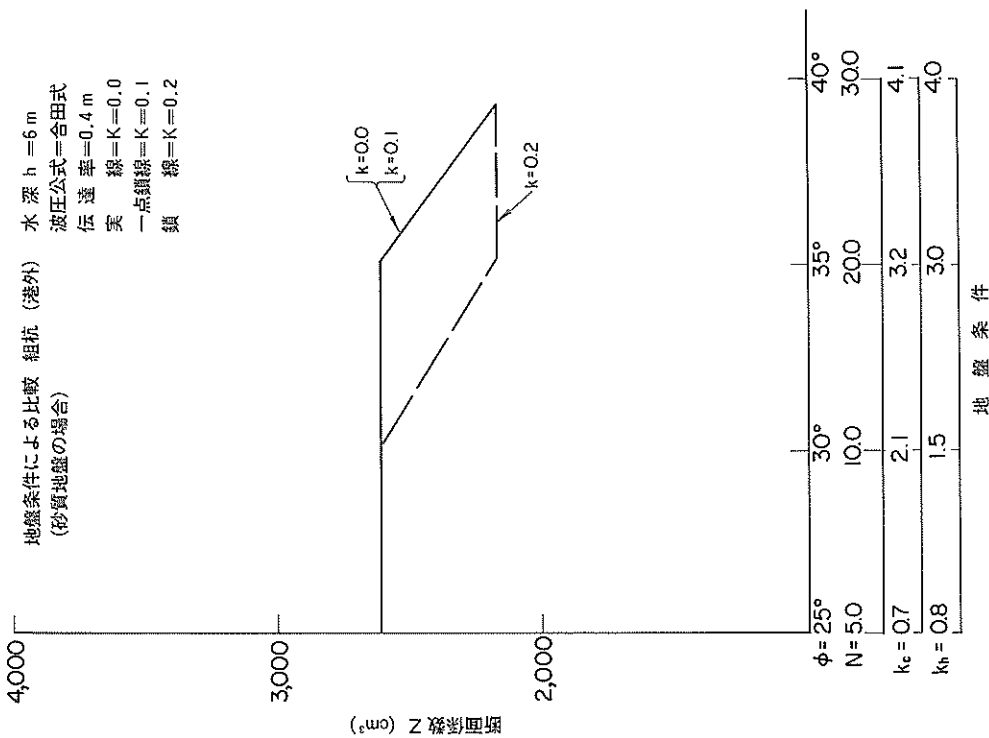


図-42 地盤条件と断面係数

地盤条件による比較 組杭 (港外)
(砂質地盤の場合)

水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 実線 = $k = 0.0$
 一点鎖線 = $k = 0.1$
 鎖線 = $k = 0.2$

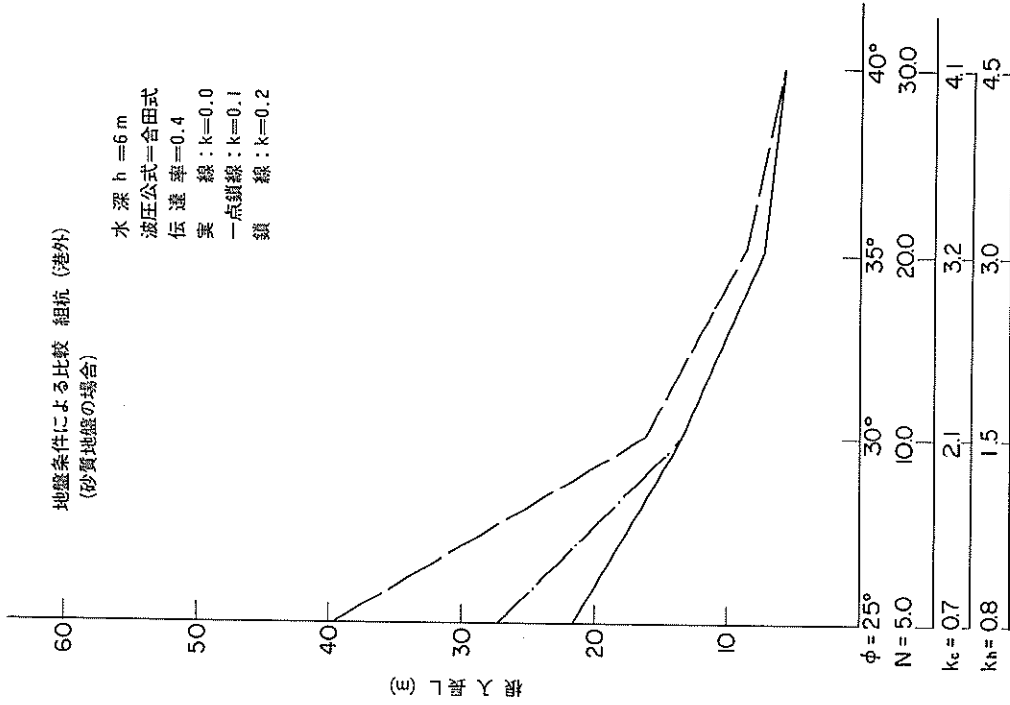


図-43 地盤条件と根入長

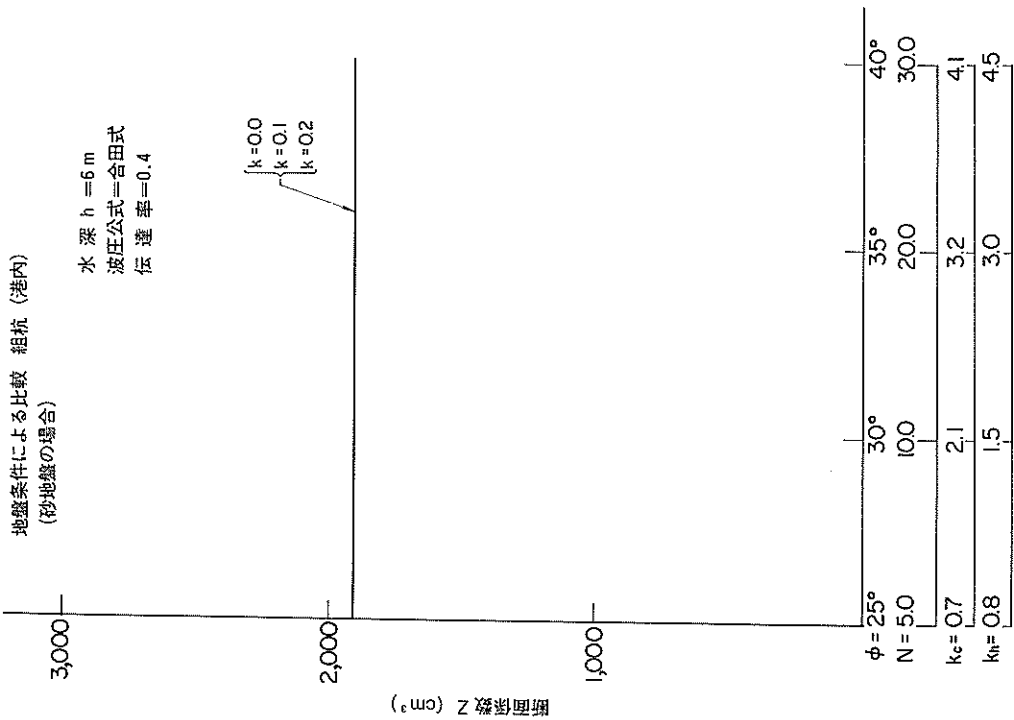


図-44 地盤条件と断面係数

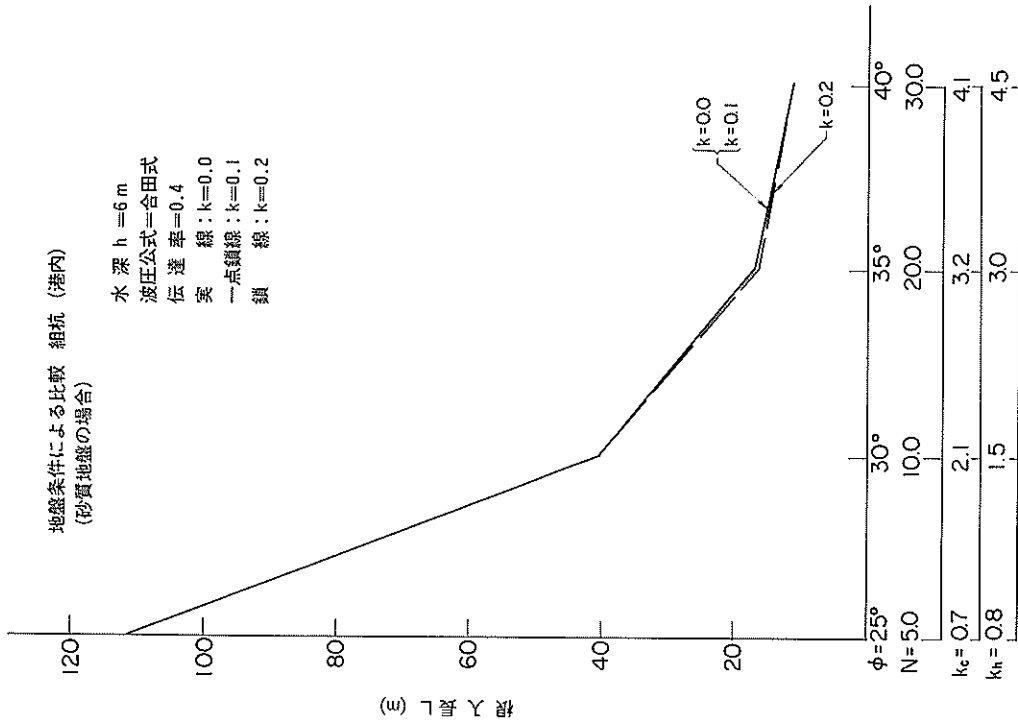


図-45 地盤条件と根入長

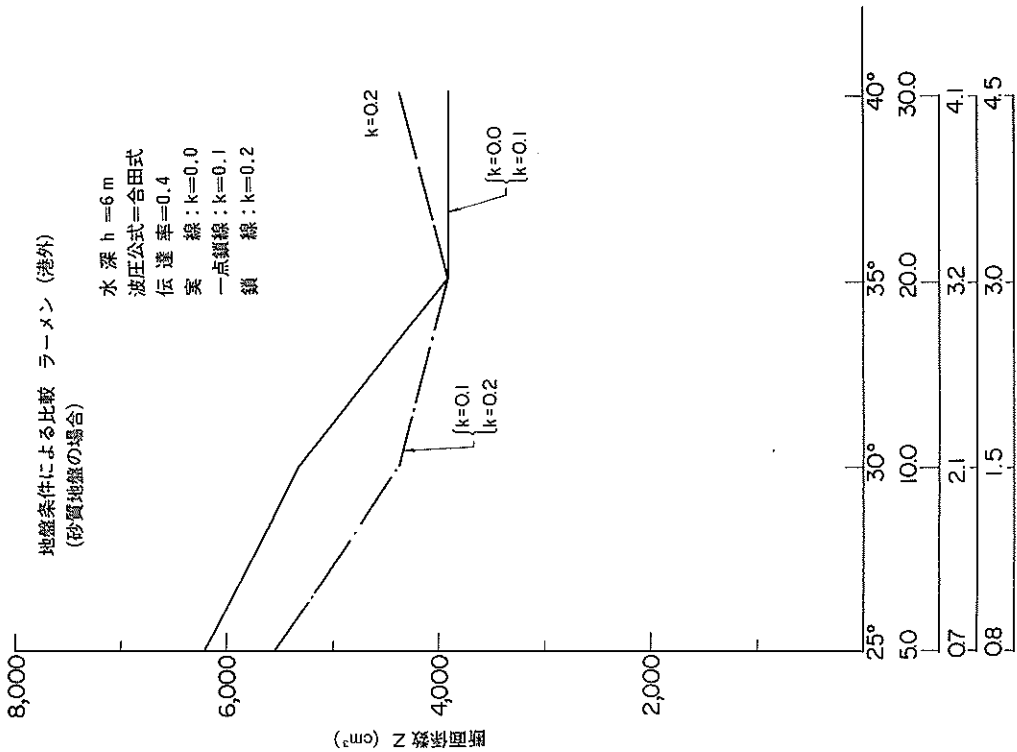


図-46 地盤条件と断面係数

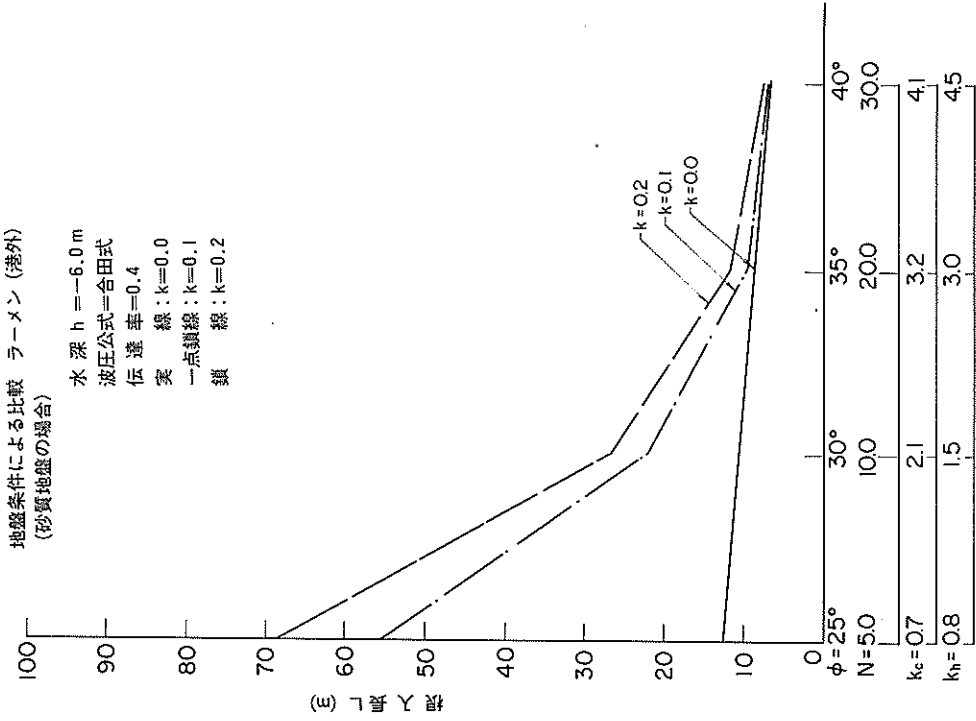
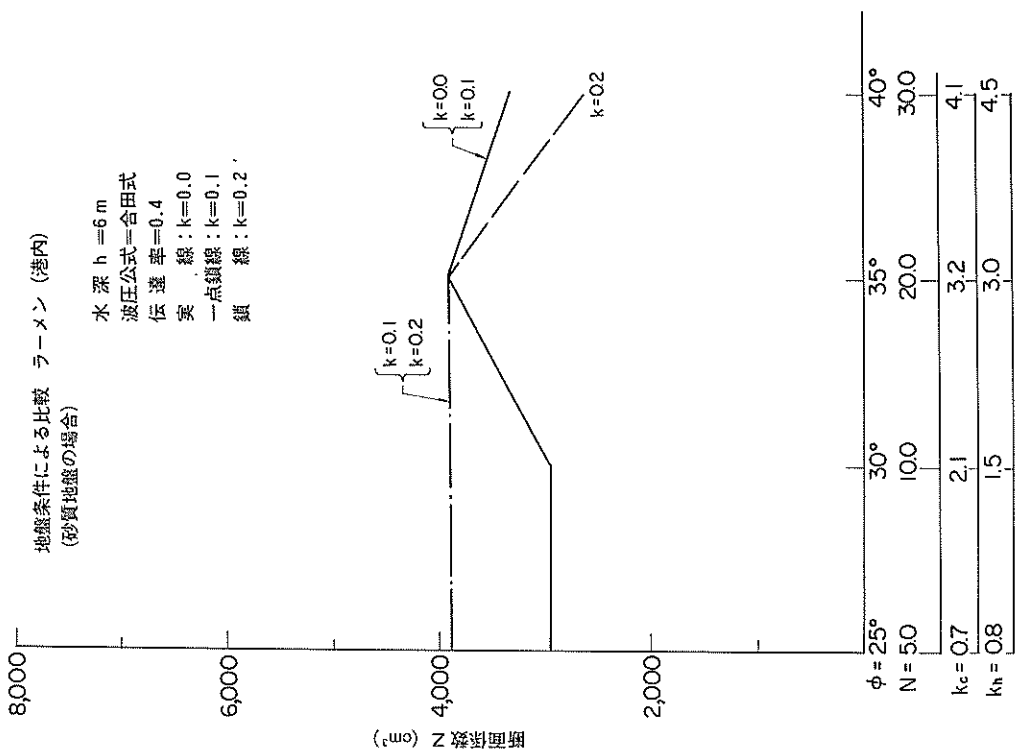


図-47 地盤条件と租入長

地盤条件による比較 ラーメン (港内)
(砂質地盤の場合)

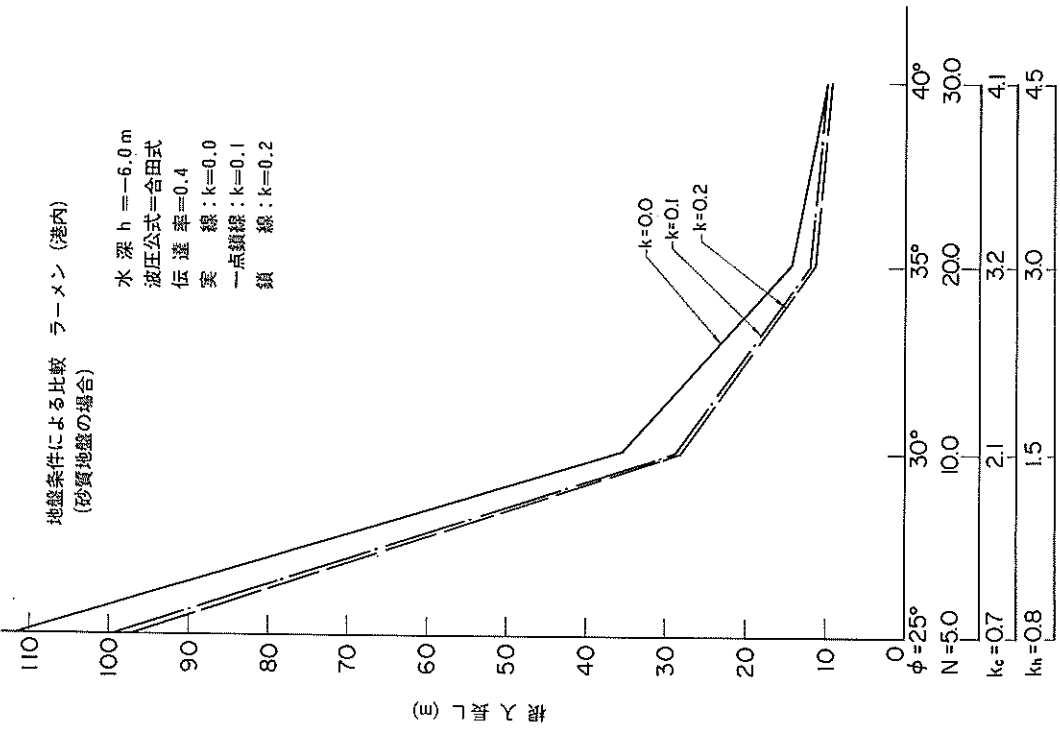
水深 $h = 6.0 \text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 実線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



地盤条件
 図-48 地盤条件と断面係数

地盤条件による比較 ラーメン (港内)
(砂質地盤の場合)

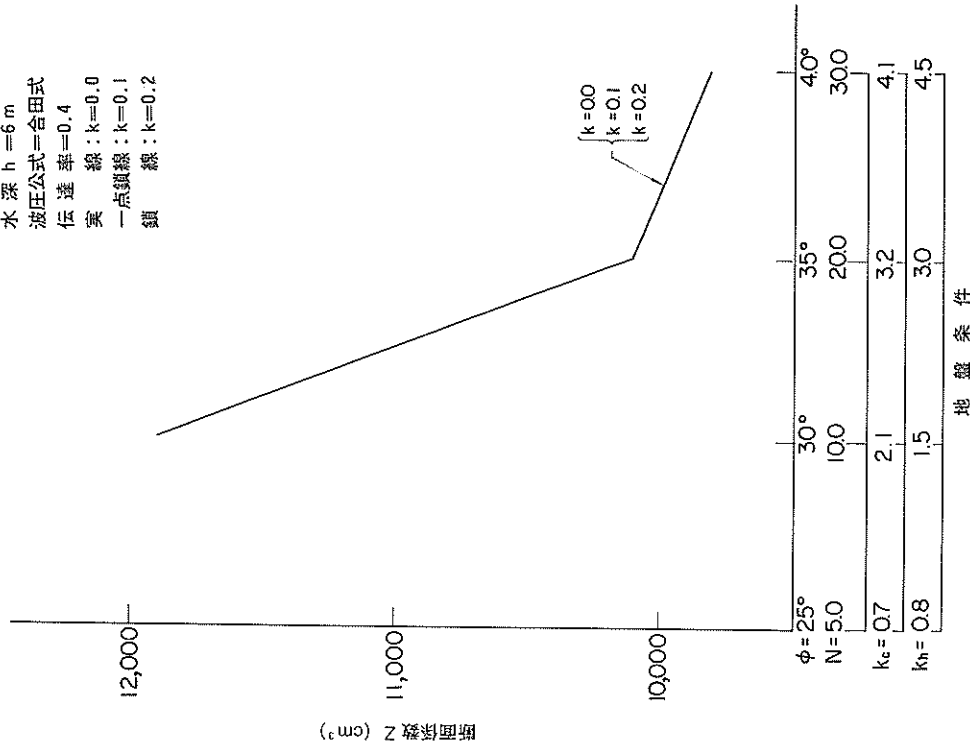
水深 $h = 6.0 \text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 実線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



地盤条件
 図-49 地盤条件と根入長

地盤条件に比較 二重カーテン (港外)

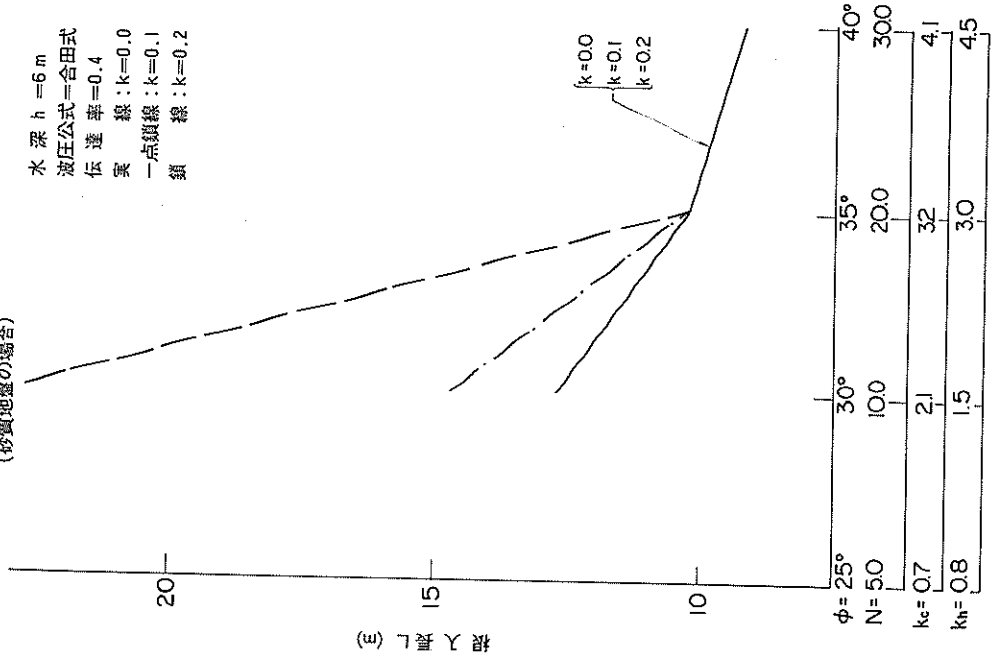
水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 実線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



地盤条件
 図一50 地盤条件と断面係数

地盤条件に比較 二重カーテン (港外)
 (砂質地盤の場合)

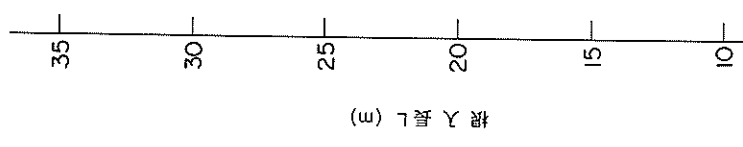
水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 実線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



地盤条件
 図一51 地盤条件と埋入長

地盤条件による比較 二重カーテン (港内)
(砂質地盤の場合)

水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 突線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



$\phi = 25^\circ$	30°	35°	40°
$N = 5.0$	10.0	20.0	30.0
$k_c = 0.7$	2.1	3.2	4.1
$k_h = 0.8$	1.5	3.0	4.5

地盤条件

図-53 地盤条件と根入長

地盤条件による比較 二重カーテン (港内)
(砂質地盤の場合)

水深 $h = 6\text{ m}$
 波圧公式 = 合田式
 伝達率 = 0.4
 突線: $k = 0.0$
 一点鎖線: $k = 0.1$
 鎖線: $k = 0.2$



$\phi = 25^\circ$	30°	35°	40°
$N = 5.0$	10.0	20.0	30.0
$k_c = 0.7$	2.1	3.2	4.1
$k_h = 0.8$	1.5	3.0	4.5

地盤条件

図-52 地盤条件と断面係数

ラーメン形式の場合、組杭と異なり、港内側杭に対しても震度の影響があらわれている。この形式は、ラーメン構造として解析を行っており、港内・外の杭の鋼比とそれぞれの杭が分担する応力に相互に関係があるため断面係数の計算結果をみると、内部摩擦角 35° を境として震度0の場合と0.2の場合の断面係数の大小関係が逆転している。これは、港内・外の杭の断面の組合せに対し、それぞれの杭の受けもつ荷重状態が異なり、工費を考え合わせて断面、根入長が決定された結果によるものである。

根入長に対する地盤条件の影響は、他のタイプと同様に内部摩擦角 25° で根入長が極端に長くなっているのが特徴的である。

d) 二重カーテン形式

図-50～図-53に二重カーテン形式の場合の地盤条件の変化による断面係数及び根入長の変化の計算結果を示す。

内部摩擦角 25° の場合、指定した最大径1,500 mmでも所定の支持力が得られなかったため図にはプロットしていない。この形式の場合、内部摩擦角 30° で根入長が極端に長くなっており、他の形式では、これが 25° であったのに対し、特徴的である。

震度の影響は、港外側の根入長に対してあらわれており、震度0.1と0.2では、根入長が大きく異っている。

4.4 計算例

(1) ラーメン形式の計算例

a) 設計条件

① 構造形式 ラーメン形式

② 杭材の選択方法

自動選定とし $\phi 1,000.0$ mmから $\phi 1,200.0$ mmの中から選択される。

③ 荷重条件

i) 港外側からの波力

常時の波の山で合田式(略算式) $H_0' = 2.0$ m

ii) 検討水位

検討水位については、0.15 mに固定している。

iii) 設計震度 $k = 0.1$

IV) 船舶力

接岸力 $F = 5.0$ tf/m, $M = 1.24$ tfm/m

けん引力 $F = 10.0$ tf/m, $M = 24.8$ tfm/m

(法線方向1 m当り)

V) 上載荷重

波圧時 2.0 tf/m²

地震時 1.0 tf/m²

船舶力 1.0 tf/m²

VI) 腐食代は考慮していない。

VII) 波高伝達率(K_T) $K_T = 0.4$

VIII) 土質条件

-1.10 m $\phi = 30^\circ$ $k_h = 1.5$ $N = 10.0$

-2.50 m $C_0 = 0.09$ $C_s = 0.2$ $k_h = 0.45$
 $N = 4.0$

-3.10 m $\phi = 30^\circ$ $k_h = 1.0$ $N = 9.0$

-3.50 m $\phi = 30^\circ$ $k_h = 6.0$ $N = 40.0$

IX) その他

上部工の単位体積重量 2.3 tf/m³

カーテンの " 2.3 tf/m³

中詰砂の " 2.0 tf/m³

海水の " 1.03 tf/m³

X) 形状

形状については、図-54を参照する。

(2) 計算結果

使用鋼材は、ミリサイズ鋼管杭の径900.0 mm, 肉厚9.0 mmから径1,000.0 mm, 肉厚22.0 mmまでについて計算しており、港外より常時の波の山の場合で最終断面として、港外側、径900.0 mm, 肉厚15.0 mm, 港内側、径900.0 mm, 肉厚11.0 mmを選んできており、変位量は、許容変位量に対してかなり余裕があり、応力度に対しては、港外、港内で常時に対してそれぞれ1,101.7 (kgf/cm²), 1,188.7 (kgf/cm²), 港外側より地震力に対しては、1,138.5 (kgf/cm²), 1,308.5 (kgf/cm²), 港内より地震力に対しては、2,047.8 (kgf/cm²), 1,605.7 (kgf/cm²), 接岸力に対しては、810.6 (kgf/cm²), 561.1 (kgf/cm²), けん引力に対しては、1,508.8 (kgf/cm²), 1,042.8 (kgf/cm²)となっている。結果より得られる最終工費断面は、港内より地震力が来る場合に決まった断面である。

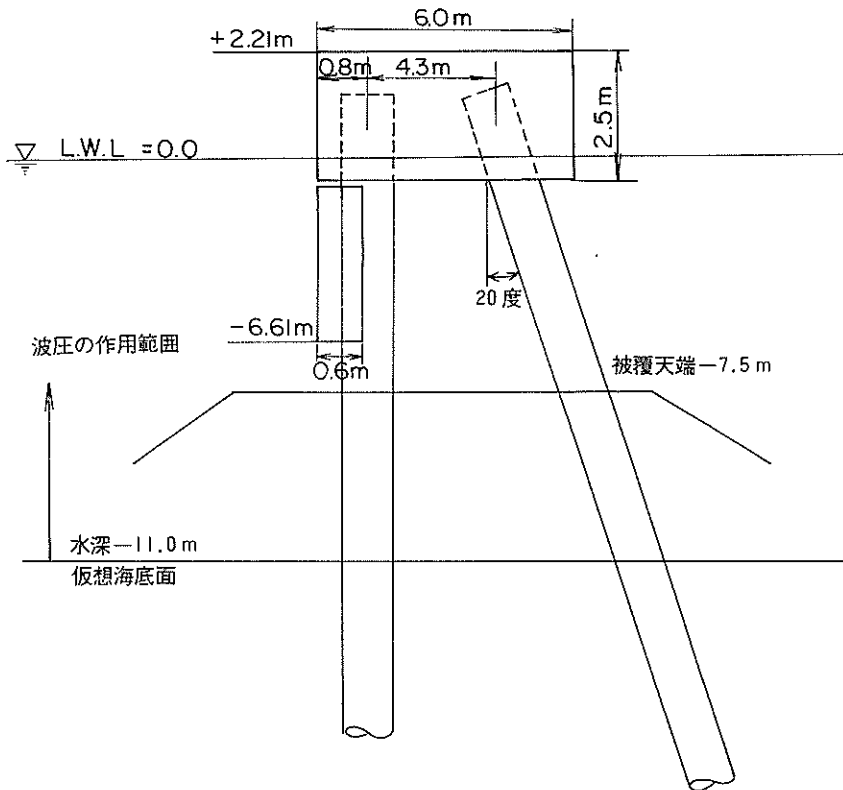


図-54 ラーメン形状

5. あとがき

今後、本システムが広く活用され設計の省力化に役立てば幸いである。

本プログラムの細部仕様の作成に当って御協力いただいた各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局の関係各位に謝意を表する次第である。

(1982年9月30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，1979年3月。
- 2) 運輸省港湾技術研究所：港湾技術研究所報告，運輸省港湾技術研究所，Vol.3 No.1，Dec. 1964。
- 3) 運輸省港湾技術研究所：港湾技術研究所報告，運輸省港湾技術研究所，Vol.17 No.4，Dec. 1978，pp. 121～167。

- 4) 新日本製鉄株式会社編集：鋼矢板マニュアル（設計編），新日本製鉄株式会社，1980年5月，pp.488～500。

港湾技研資料 No. 435

1982・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 株式会社 東京プリント

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