

鋼製カーテン防波堤について

Steel Curtain-Wall Breakwater

鈴木 吉彦*

Yoshihiko Suzuki

山口 銑治**

Senji Yamaguchi

Synopsis :

In Japan, although some types of "curtain-wall" breakwaters are constructed, they have difficulty in construction and lack in strength to a certain degree. This report outlines Kawasaki Steel's new type "curtain-wall" breakwater which is composed of steel pipe pilings and curtain-wall, using T-shaped steel beams or steel sheet pilings, with steel band employed as a connector in between. The results obtained through the construction of this curtain-wall breakwater are as follows:

- 1) Easier construction work
- 2) Low construction cost
- 3) Short construction period
- 4) Accurate construction work
- 5) High stability against waves

1. ま え が き

港湾施設にかかせないものとして、港内の静穏を維持し、荷役の円滑化、船舶の航行、停泊の安全および港内施設の保全、貯木などを目的とした防波堤があげられる。

カーテン防波堤とは、Fig. 1に示すように、水面付近に波止用のカーテン壁を設けた防波堤をいい、わが国でこれまでに施工されている例として

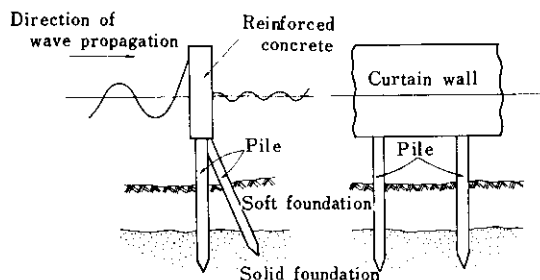


Fig. 1 Curtain-wall breakwater

清水港折戸湾の貯木場波除堤 (Fig. 2), 名古屋港

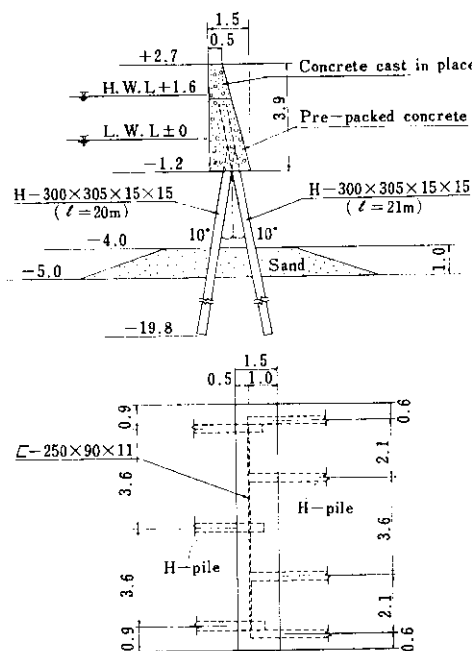


Fig. 2 Breakwater used for timber yard at Bay Ordo (Unit : m)

* 神戸建材部建材技術室副部長

** 神戸建材部建材技術室掛長

稲永埠頭前波除堤 (Fig. 3), 西宮ヨットハーバー
防波堤 (Fig. 4) などがある。

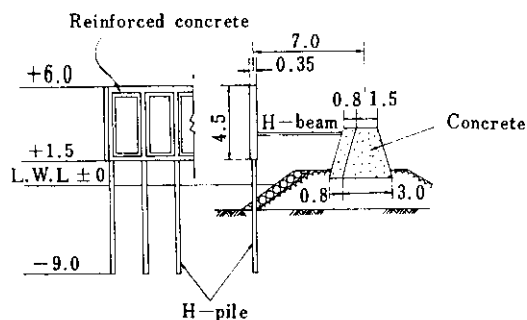


Fig. 3 Breakwater at the front of Inane Wharf, Port Nagoya

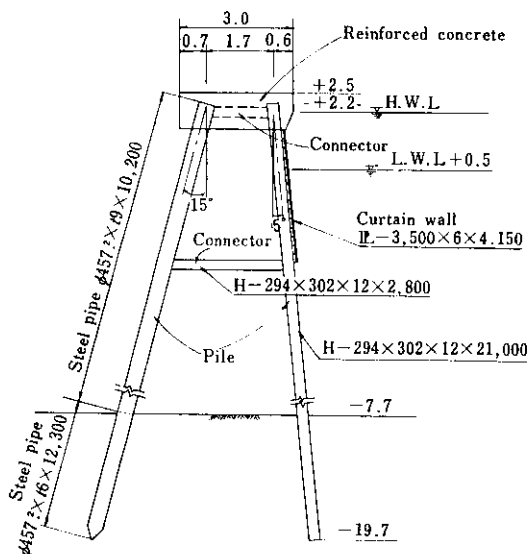


Fig. 4 Cross section of curtain-wall breakwater at Nishinomiya yacht harbour

波を完全にしゃ断する従来の傾斜堤, 直立堤, 混成堤などと異なり, カーテン防波堤は, 水深に比べて, 波長の比較的小さい地域において, 波止壁 (カーテン壁) 部分で波のエネルギーを幾分吸収し, 堤内を静穏に保つことを目的としている。したがって堤内波高を, 一定の値まで許容できる場合に対しては, 一般に波を完全にしゃ断する構造よりも経済的である。

またカーテン防波堤は, 重量が他の防波堤に比べてきわめて小さいうえ, カーテン壁をクイで支

持する構造であるため, 軟弱地盤が深くても, ほとんど地盤改良工事を必要としない利点がある。

しかしこれまでに建設されているカーテン防波堤は主として施工性に難点があり, 強度的にも多少信頼性を欠いていた。

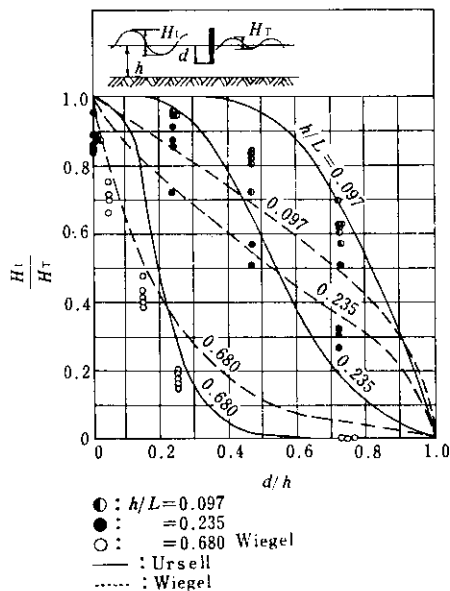
このたび, 強度的に安定性が高く, 施工性のよい鋼製カーテン防波堤を開発したので, 以下にその設計法と構造の概要について述べる。

2. 設計法の概要

カーテン防波堤の設計は, カーテンとそれを支持する組グイについて行なう。

従来一般に採用されている設計法は, カーテン壁の大きさ, および作用波圧については, 森平, 柿崎¹の提案にしたがい, また支持グイの計算は港湾構造物設計基準²によっている。以下その概要を述べる。

- (1) 建設地点における水深 (h) と波長 (L) の比 h/L と設計波高 (入射波高 (H_I)) と港内での許容波高 (H_T) の関係から, Fig. 5 を利用



h : The depth of water
 d : Distance from the bottom of vertical barrier to water level
 H_I : Wave height of incidence
 H_T : Wave height of transmission
 L : Wave length

Fig. 5 Transmission coefficient curve of waves

して、カーテン壁の静水面からの深さ (d) を定める。

- (2) カーテン壁への波の打上げ高さを Fig. 6 から求め、天端高さを定める。

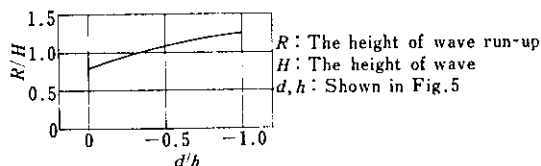
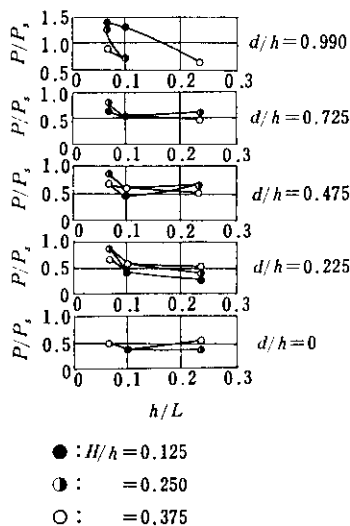


Fig. 6 Relation between the height of wave run-up and d/h

- (3) カーテン壁に作用する波力 P を Sainflou 式および Fig. 7 より求める。



P : Actual wave force
 P_s : Wave force by Sainflou's formula

Fig. 7 Relation between the ratio of Actual Wave Force to Those by Sainflou's formula and h/L

Sainflou 式

$$p_1 = (p_2 + w_0 h) \left(\frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_2 = \frac{w_0 H}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに p_1 : 壁面に波の山があるときの

静水面における波圧強度 (t/m^2)

p_2 : 海底面における波圧強度 (t/m^2)

w_0 : 水の単位体積重量 (t/m^3)

δ_0 : 壁面における波高中分面の静水面上の高さ (m)

h : 壁体前面の水深 (m)

H : 壁体設置位置における進行波としての波高 (m)

L : 水深 h における波長 (m)

- (4) カーテン壁の断面力は、組グイ間隔を支間とし、(3)で求めた波圧を分布荷重とする単純バリとみなして求める。

- (5) 支持グイの計算

Fig. 8 において

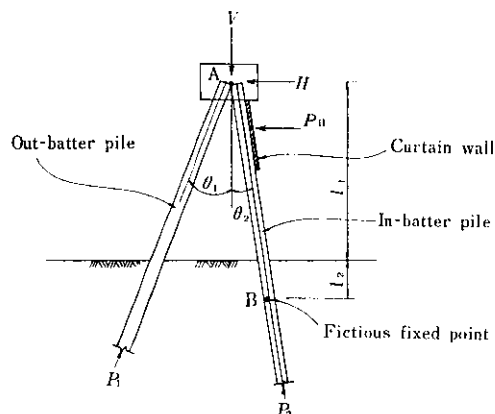


Fig. 8 Cross section of curtain-wall breakwater

- (i) 前面グイの仮想固定点 B の位置を次式で求める。

$$l_2 = \frac{1}{\beta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_S}{4EI}}$

E_S : 地盤の弾性係数 (t/m^2)

EI : クイの曲げ剛性 ($t \cdot m^2$)

- (ii) 前面グイを組グイ交点 A と点 B を支点とする単純バリとみなして、これに波圧合力 P_u が作用したときの A 点の支点反力 H と、クイに生ずる最大曲げモーメント M_r を求める。

- (iii) H と、クイ頭部コンクリートの自重 V を用いて、次式から、各クイに作用するクイ軸方向力を計算する。

$$P_1 = \frac{V \sin \theta_2 + H \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$P_2 = \frac{V \sin \theta_1 - H \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad \cdots \cdots (6)$$

- (iv) クイ根入れ地盤の土質データを考慮して各クイの必要な根入れ長さを定めるが、その際(7)~(11)式²⁾を用いて、クイの支持力と最大引拔力を計算する。

- (a) 砂質地盤に打ち込まれたクイの極限支持力

$$R_U = 40NA_P + \bar{N}A_S/5 \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに

R_U : クイの極限支持力(t)

A_P : クイの先端閉鎖面積(m²)

A_S : クイ周の全表面積(m²)

N : クイ先端地盤の N 値

$\bar{N}$: クイ根入れ全長に対する平均の N 値

ただし N は次式で求める。

$$N = (N_1 + \bar{N}_2)/2$$

ここに

N_1 : クイ先端位置での N 値とクイ先端より下方へ $2B$ なる範囲の平均 N 値のうち、いずれか小さい方の値

$\bar{N}_2$: クイ先端より上方へ $10B$ なる範囲内の平均の N 値

- (b) 粘性土地盤に打ち込まれたクイの極限支持力

$$R_U = 8c_P A_P + \bar{c}_a A_S \quad \cdots \cdots (8)$$

ここに

c_P : クイ先端位置での粘着力(t/m²)

$\bar{c}_a$: クイ根入れ全長に対する平均付着力(t/m²)

ただし付着力は次式により求める。

$$c < 3.5 \text{ t/m}^2 \text{ のとき } c_a = c$$

$$c \geq 3.5 \text{ t/m}^2 \text{ のとき } c_a = 3.5 \text{ t/m}^2$$

ここに

c : 粘着力(t/m²)

- (c) 粘性土地盤を貫通し砂質地盤に打ち込まれたクイの極限支持力

$$R_U = 40NA_P + (\bar{N}_s L_s/5 + \bar{c}_a L_c)\phi \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに

$\bar{N}_s$: 砂質地盤中のクイ周辺地盤の平均の N 値

L_s : 砂質地盤中にあるクイの長さ(m)

$\bar{c}_a$: 粘性土層中クイ周辺地盤の平均付着力(t/m²)

L_c : 粘性土地盤中にあるクイの長さ(m)

ϕ : クイの周長(m)

- (d) 単グイの最大引拔力

$$R_{ut} = R_f = \phi L \bar{f}_s \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\bar{f}_s = \Sigma(c_{ai} + K_s q_i \mu) l_i \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに

R_{ut} : クイの最大引拔力(t)

R_f : クイの周面摩擦力(t)

ϕ : クイの周長(m)

L : クイの根入れ長さ(m)

$\bar{f}_s$: 平均周面摩擦強度(t/m²)

c_{ai} : 第 i 層における土とクイの付着力(t/m²)

c_i : 第 i 層における粘着力(t/m²)

K_s : クイに作用する水平土圧係数

q_i : 第 i 層における平均有効土カブリ圧(t/m²)

μ : クイと土の摩擦係数

l_i : 第 i 層の層厚(m)

またクイ断面が(ii)(iii)で求めた P_1 , P_2 および M_p に耐えられるか否かをチェックする。

なお(iii)に示した(5), (6)式は、組グイが外力に対して軸方向力のみによって抵抗すると考えた場合の計算式であり、クイの曲げたわみによる土の横抵抗が無視されている。最近クイの曲げたわみを考慮した計算式が提案されているが³⁾、それによると(5), (6)式より求める軸方向力は過大な値を与えるようである。しかしクイの曲げたわみを考慮した計算式は、多くの仮定に基づいており、未解明な問題も含んでいるので、一概に(5), (6)式との優劣は判断し難いのが現状である。

3. 新鋼製カーテン防波堤

3.1 従来の工法の問題点

これまでに建設されたカーテン防波堤、たとえば Fig. 4 のような構造型式では、つぎのような難点があった。

- (1) 防波堤前面の支持グイに H 形鋼を使用するため、打設時に回転や、傾斜を生じた場合、カーテン壁を設計どおり同一平面上に設置することは不可能に近く、その取付け作業もきわめてむずかしい。またクイが回転した場合（ねじり変形も含む）クイの断面剛性がかなり低下し、強度的には実用上とくに問題にならなくても変位量が大きくなるなど好ましくない現象を生ずる恐れがある。
- (2) 前面支持グイを打設した結果、頭部が不ぞろいになった場合、あらかじめクイに開けてあるボルト穴のレベルが合致しないため、波止材を水平に設置することは、まず不可能である。たとえボルト穴をクイの打設後にあけるとしても、水中作業となるため、きわめて非能率的である。

(3) クイに対する波止材の取付けがほとんど潜水夫によるボルト締め作業となるため、能率が低く、陸上作業にくらべると相当割高になる。

(4) H 形鋼グイは海水による腐食面積が大きいため、防食費でみると、腐食代を見込む場合でも、電気防食法を採用する場合でも、鋼管グイより割高となり不利である。

3.2 新鋼製カーテン防波堤の概要

3.1 で述べたような問題点を改良するため種々検討した結果 2 種類の新しいタイプの鋼製カーテン防波堤を考案した。カーテン壁の構造によって、A、B 2 つのタイプに区分される。

A タイプとは、まず鋼管グイ 2 本からなる組グイを、クイ打機で所定の間隔に打設し、波浪に面する前面のクイに別途製作した鋼製バンドをはめ込み、このバンドにカーテン壁として C T 形鋼をボルトで取り付けたのち、クイ頭部を鉄筋コンクリートで補強した構造をいう。

B タイプとは、組グイ 1 スパン分のカーテン壁をあらかじめ鋼矢板および腹起しで組み立て、クレーンによって所定の位置に吊り下げた構造をいい、ほかは A タイプと同じである。

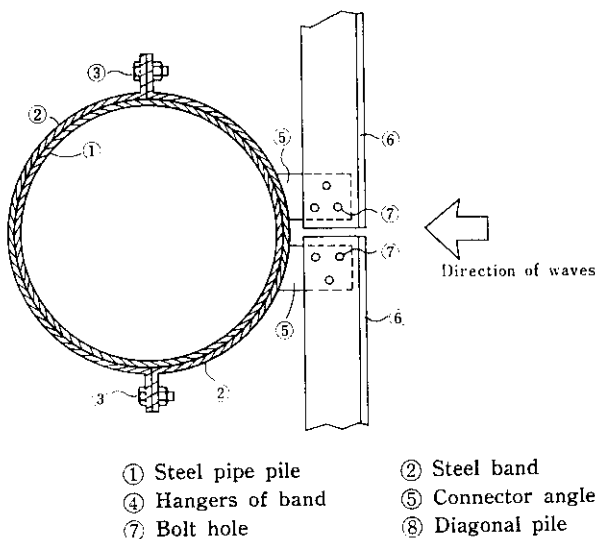


Fig. 9 Detail of connection of curtain-wall member and pile, (A-type, A-A section)

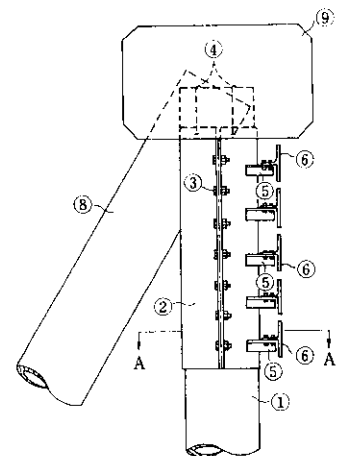


Fig. 10 Cross section of Curtain-wall breakwater (A-type)

3.3 施工法

(1) Aタイプ

Fig. 9 および Fig. 10 において、

- (i) まず円形グイ①および⑧を所定の位置に打設する。
- (ii) クイ①の打設時における傾斜、偏心量を考慮のうえ、あらかじめ加工した円筒形の鋼製連結バンド②に波止取付材、たとえば山形鋼⑤を溶接し、ボルト穴をあける。

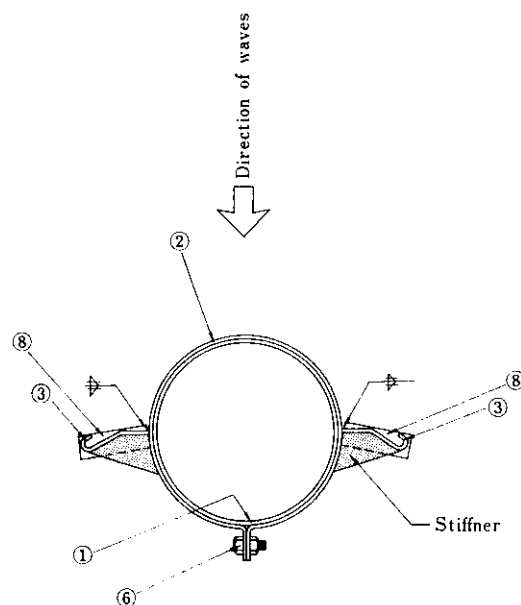


Fig. 11 Detail of steel band and connectors (B-type)

- (iii) 波止材、たとえばC T形鋼⑥を所定の長さに切断し、クイ①の傾斜、偏心量を加味してボルト穴をあける。
- (iv) 連結バンド②をクレーンなどでつり上げ、クイ①にはめ込み、所定の位置にセットした後、ボルト③を締めつける。
- (v) 支持グイ①が鋼管グイの場合、連結バンド②の上端を水面上に出るようにしておき、その全周をクイ①に溶接する。
- (vi) 波止材⑥を波止取付材⑤にボルトでとめ

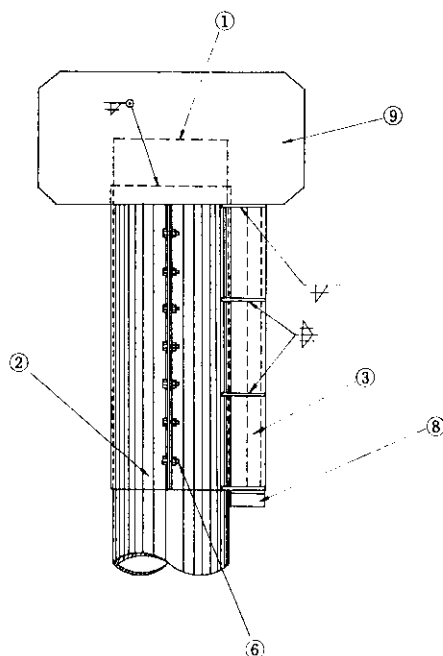


Fig. 12 Side view of Curtain-wall breakwater (B-type)

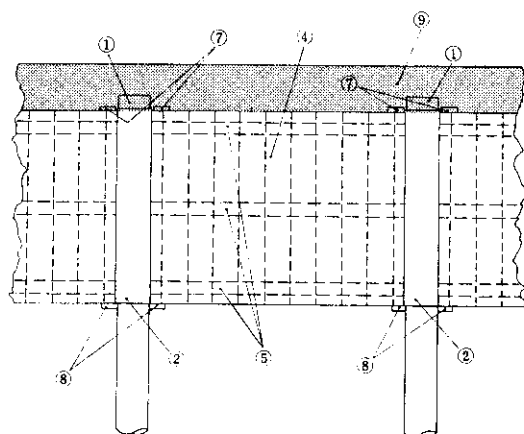


Fig. 13 Front view of Curtain-wall breakwater (B-type)

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| ① Steel pipe pile | ⑥ Bolt |
| ② Steel band | ⑦ Upper stopper |
| ③ Connector | ⑧ Lower stopper |
| ④ Curtain-wall | ⑨ Reinforced concrete |
| ⑤ Waling | |

る。

- (vii) クイ頭部に鉄筋コンクリートを打設する。

以上で完成である。

(2) Bタイプ

Fig. 11, 12, 13 において

- (i) 円形グイ①および背面の斜グイを所定の位置に打設する。
- (ii) クイ①の打設時における傾斜, 偏心量を考慮のうえ, 円形バンド②の外側長手方向に, カーテン④がつねに鉛直となるよう, カーテン取付用金具, たとえば異形鋼矢板③を陸上で溶接する。またその下端にストッパー⑧を溶接しておく。
- (iii) カーテン④は, 陸上で鋼矢板で Fig. 13 のように1ブロックを組み立て必要に応じて腹起し⑤で補強する。つぎにAタイプの場合の(iv)(v)と同じ作業を行なう。
- (iv) カーテンのブロック④をクレーンでつり上げ, カーテン取付用金具③を継手金具(鋼矢板のつめに相当する)をかみ合わせながら, 所定の位置まで下げ, ストッパー金具⑦をカーテン取付用金具③の上端に溶接する。
- (v) クイ頭部に鉄筋コンクリートを打設する。
- 以上で作業完了である。

3.4 本工法の特長

本工法の特長をあげるとつぎのとおりである。

- (i) 円形グイを使用するため, クイ打設時に回転を生じても, クイの剛性は不変で, 波浪に対して強度上弱点とならない。また回転,

傾斜, クイ頭部の不ぞろいなどが起こっても, 波止取付材およびボルト穴の位置(Aタイプ)あるいは, カーテン取付用金具の位置(Bタイプ)を現場合わせて定めるので, 波止材(またはカーテン)の法線を設計どおり, 一直線にすることも, 水平, 鉛直にすることもできる。

- (ii) Bタイプによれば, カーテン取付作業がほとんど陸上作業となり, 作業能率が大幅に向上する結果, 工期がかなり短縮される。またAタイプについても, 施工可能な範囲で波止材と連結バンドを陸上で仮締めして一体化しておくことにより, Bタイプと同様な効果が期待できる。

- (iii) 3.1(4)でのべたとおり, 腐食に対してはHグイよりも鋼管グイの方が有利である。また軸方向力に対する支持力, とくに前面グイの引抜力に対しては, マサツ面積の最も大きい円形グイがHグイよりすぐれている。

- (iv) カーテン壁をコンクリートで作る場合に比べて, 工期が約 $\frac{1}{2}$ に短縮され, 強度的な信頼性(安定性)にすぐれており, また建設費も10~20%割安である。

なお鋼製カーテン防波堤の波浪に対する挙動を調べるため, 西宮港防波堤(Fig. 4)で水平加力実験が行なわれ, 強度上とくに問題のないことが確認されている⁴⁾。

4. 施 工 例

本工法によって施工されたカーテン防波堤をTable 1に示す。

Table 1 Curtain-wall breakwater constructed by new method (A-type)

Constructor	Place	Completion time	The top height of breakwater (m)	The depth of water (m)	Designed wave height (m)	The height of curtain (m)	Construction length (m)	Construction cost (YEN/m)	Construction period (month)
Kyoto prefecture	Ogimi timber yard at Port Maizuru	Mar. 1969	+1.2	-10.7	0.8	1.7	145	244,000	3.0
Kyoto prefecture	Kita timber yard at Pport Naizuru	Feb. 1970	+1.0	-4.8~-6.7	0.45	1.0	340	160,000	7.0
Ōtu city	Simanoseki district, Lake Viwa	Mar. 1971	+2.5	-3.0	1.5	2.6	180	256,000	4.5

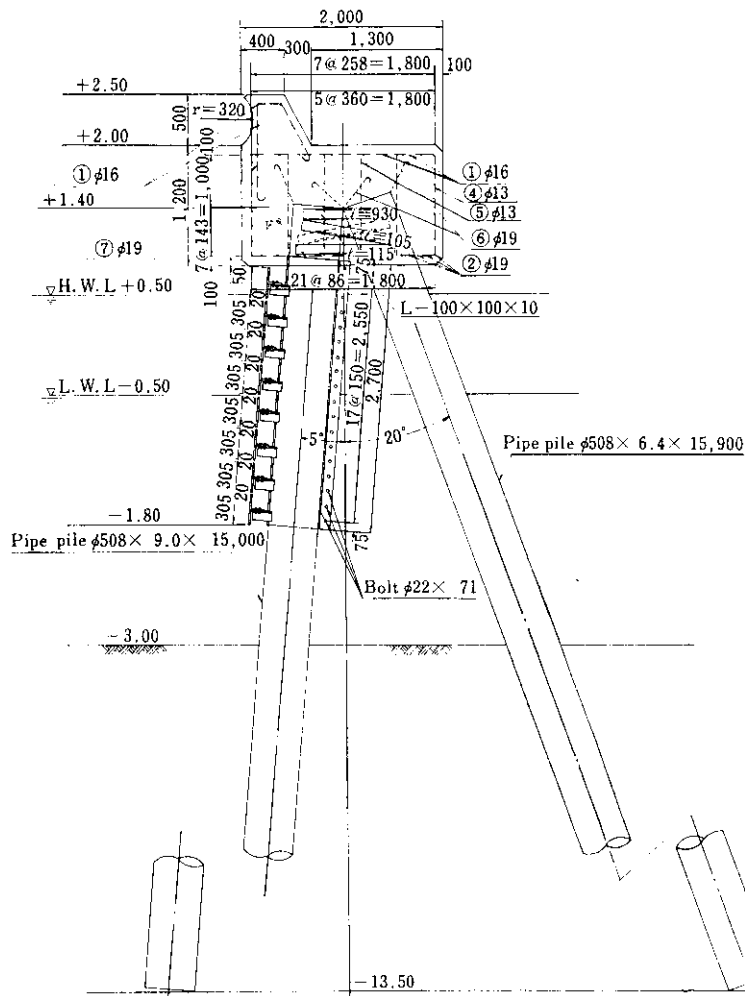


Fig. 14 Cross section of curtain-wall breakwater, Lake Biwa

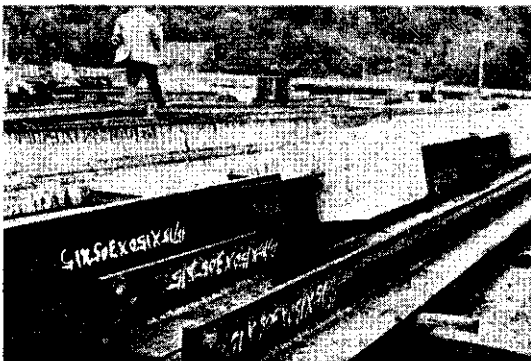


Photo. 1 Close-up view of T-beams at Port Maizuru, white blocks are aluminum anodes for protection



Photo. 2 View of piles driven by diesel pile hammer, Lake Biwa. Angle connectors are used at the top of them

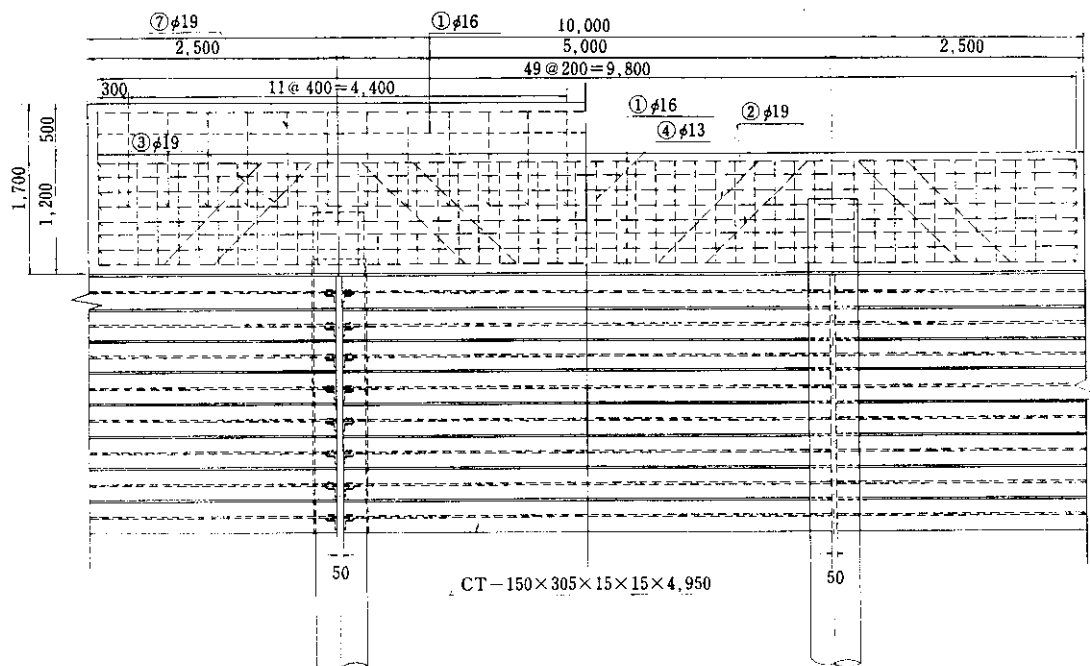


Fig. 15 Front view of curtain-wall breakwater, Lake Biwa

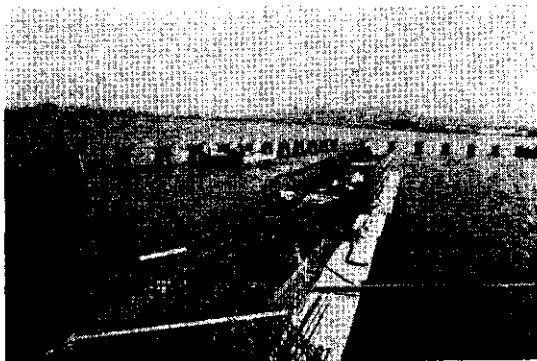


Photo. 3 General view of the reinforcement, Lake Biwa

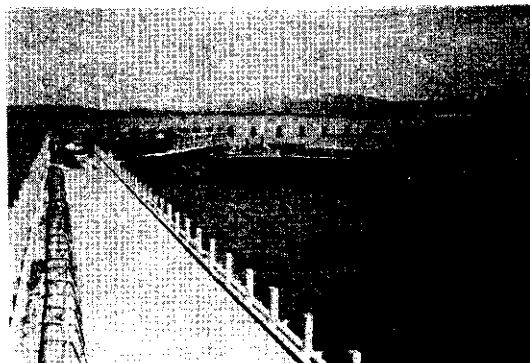


Photo. 4 View of the curtain-wall breakwater half completed, Lake Biwa

京都府舞鶴港大君貯木場および琵琶湖島の関地区に建設されたカーテン防波堤の現場写真を、Photo. 1～Photo. 4 に示す。

また参考までに琵琶湖島の関防波堤の構造図を Fig. 14, Fig. 15 にあげておいた。

なお本工法によって建設されたカーテン防波堤 (Table 1 参照) は、いずれも十分消波機能を果していることが観測されている。

5. あとがき

新しいタイプの鋼製カーテン防波堤の概要を紹介したが、現在の構造について今後さらに検討すべき課題としては、

- (1) 円形バンドの加工費の低減をはかること
- (2) 水中作業をなくすること

- (3) 円形バンドと波止材を陸上で連結し、ユニット化して施工できるようにすること
 - (4) 構造物全体の耐久化をはかること
 - (5) カーテン防波堤としてだけでなく、波を完全にしゃ断する在来の本格的な防波堤にも応用できる構造にすること
- などがあげられる。また設計に関しては、
- (6) 入射波高、水深、波長などいろいろ異なった条件下におけるカーテン壁の静水面からの深さと波の打上げ高さおよび堤内波高を測定し、計算式の妥当性を確認すること
 - (7) 組グイ頭部の結合状態が、実際には(5)、(6)

式で仮定したようなピン結合ではなく剛結または半剛結の状態にあるものと考えられる。したがってこのような連結の程度が、クイの分担力および発生応力にどのような影響を及ぼすかを明らかにすること

などをあげることができる。

いずれにせよ、今後研究を重ねて改良を加えていきたいと考えている。

おわりに、この防波堤の開発に際していろいろに指導をいただいた京都府舞鶴事務局および大津市建設部の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 森平倫生，柿崎秀作：カーテン防波堤とその特性について，第11回海岸工学講演会講演集，222（1964）
- 2) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準
- 3) 片山猛雄，瀬川宗亮，内田豊彦：組ぐいの設計法について（その1・その2），港湾技研資料，（1969）85，（1970）110
- 4) 西川勉，石井敦，嶋文雄，加藤親男：西宮港防波堤とその水平加力試験，第11回全国港湾工事報告会報告概要，20（1965）