

港 湾 技 研 資 料

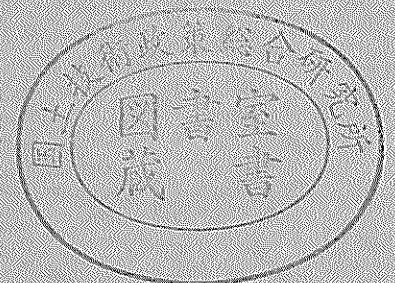
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 526 June 1985

大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その2)
—断続的に構造物を設置する場合の伝達率—

谷 本 勝 利
吉 本 靖 俊
道 下 勲

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 対象構造物と検討方法	4
2.1 波浪制御構造物	4
2.2 検討方法	5
3. 数値波動解析法による計算	6
3.1 計算条件	6
3.2 計算結果	8
4. 水理実験による検討	15
4.1 実験条件	15
4.2 測定および解析方法	17
4.3 実験結果	19
5. 各構造に対する具体的計算例	24
6. あと が き	25
参 考 文 献	26
主要記号一覧表	26
付 図	27

Transmission Coefficient of Breakwaters with Openings Intermittently along the Center Line of Breakwaters

— A Study on Development of Deep-water Breakwaters (Part 2) —

Katsutoshi TANIMOTO*
Yasutoshi YOSHIMOTO**
Isao MICHISHITA***

Synopsis

As the constructing cost of deep-water breakwaters which provide calm sea area in open sea is considered to be expensive, it is important to make it smaller as well as to overcome difficulties in constructing them in deep sea area. In the present report, the characteristics of transmitted wave through the breakwaters with openings intermittently along the center line of breakwaters are examined numerically and experimentally. Transmitted waves behind permeable breakwaters can be considered as the composite waves of two diffracted waves, one is transmitted through the permeable breakwaters and the other is transmitted through the openings. In order to evaluate the calmness the composite transmission coefficient is introduced which is the ratio of the average wave height of composite waves in a test area to that of the incident wave. Numerical analysis for wave propagation is applied for the regular waves to estimate the diffracted wave height behind the breakwaters. In the case of irregular waves this method is also applied for each components of irregular waves, and the composite transmission coefficient can be derived by compounding the results. With numerical results the diagram is presented which shows the appropriate width of openings when the transmission coefficient of permeable breakwaters itself and the required composite transmission coefficient are fixed.

In the hydraulic experiments, the wave heights of fundamental component of diffracted waves coincident with the numerically estimated values very well. The numerical analysis for wave propagation is approved to be reliable in estimating wave heights behind breakwaters.

Three types of deep-water breakwaters reported in previous report is examined and the appropriate opening ratios along the center line of breakwaters are following:

Three dimensional lattice breakwater with horizontal board;	0.24
Round crown breakwater;	0.29
Double cell breakwater;	0.27

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
*** Trainee of Port and Harbour Research Institute in F.Y. 1984
(Penta-Ocean Construction Co. Ltd., Engineering Research Institute)

大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その2)

—断続的に構造物を設置する場合の伝達率—

谷 本 勝 利*
吉 本 靖 俊**
道 下 勲***

要 旨

外海の巨大な波浪を制御し適度に静穏な海域を造成することを目的とする波浪制御構造物は沖合の大水深海域に建設されるため、これらの実現に向けては建設技術の克服はもちろんのこと、建設工費を少なくすることも重要な課題である。この一方策として本資料では、適度に静穏な海域を維持しながらその延長方向に開口部を設けて透過性構造物を配置する方法を検討した。

延長方向に開口部を有する場合、背後域は透過性構造物を透過する伝達波による回折波と、開口部からの回折波が共存する領域であり、そこでの波は両者の合成と考えることができる。本資料では構造物背後の所定の検査域における波高分布から平均的波高を求め、これの入射波高に対する比(合成伝達率)により伝達率を評価した。回折波による波高分布の推定には各規則波ごとに数値波動解析法を用いた。また、不規則波に対してもそれを構成する成分波ごとに同様な計算を行い、結果を合成することにより算定可能である。この結果、透過性構造物自体の伝達率と所要の合成伝達率が与えられたときの必要な開口率(延長方向堤体長と開口部幅の和に対する開口部幅の比)を求める算定図を示した。

水理実験では、不透過構造物が開口部を有しているときの規則波および不規則波に対する堤内波高分布を測定した。この結果、規則波の場合には伝達波の基本周波数成分波の波高分布は数値計算結果と非常に良く一致した。波の非線形性から励起される高次周波数成分波についてはパワーが基本周波数と比べて小さくなることを考えると、波の非線形性を考慮していない数値波動解析法による波高の推定法はほぼ妥当であると言える。

本資料で対象としている三種の波浪制御構造物について背後域の合成伝達率を $0.56 (T_{1/3} = 14.0 \text{ s}, H_{1/3} = 9 \text{ m} \rightarrow 5 \text{ m})$ とする開口率は以下のとおりである。

水平板付立体骨組構造(伝達率 0.40)	0.24
上部半円形断面構造(伝達率 0.30)	0.29
透過壁式二重セル構造(伝達率 0.35)	0.27

1. ま え が き

防波堤は本来、外海の激しい波浪から静穏な海域を確保するため設けられるものであり、我が国では捨石マウンド上に不透過なコンクリートケーソンを据え付けた混

成堤を間隔をおかず連続的に配置するのが一般的である。この型式は基本的には、海水を遮断して波の侵入をほぼ完全に阻止するものであり、反射波が大であるとか、流れが阻害されるとかの水理特性に難点がある。また、大水深、大波浪条件では大断面となり工費が著しく大とな

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

*** 昭和59年度港湾技術研究所研修員(五洋建設株式会社 技術研究所)

る等の問題がある。そこで筆者らは、外海の大水深における巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を造成することを目的とした構造物を波浪制御構造物と称し、水理特性に優れ、しかも経済的な波浪制御構造物の開発に関する研究を昭和57年度から推進してきた。そして、既に3種の海底設置型の波浪制御構造物（水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造）を提案し、その反射および伝達特性に関する実験的研究の成果を報告した¹⁾。これらの3種の波浪制御構造物は、いずれも透過性構造のため、外海の波の侵入を完全に阻止するものではないが、背後域の静穏を確保することは十分可能であるほか、透過性構造であるゆえ堤体に作用する波力の軽減を計ることも可能であり、波浪制御構造物として十分有効であると言える。しかし、適度に静穏な海域を経済的に造成するという観点から、これらの波浪制御構造物の延長方向の配置法に関して検討する余地が残されている。すなわち、透過性構造物を一定間隔で開口部を設けて配置した場合でも背後域の所要の伝達率が確保できるならば、構造物の実施工延長は開口部の分だけ少なくすることができ、より経済的な波浪制御構造物の築造が可能となる。

本資料はこの目的のため、透過性構造物の延長方向に一定間隔で開口部を設けて配置した場合や、千鳥状に配置した場合の伝達率の特性を数値計算および水理実験により検討し報告するとともに、上述の3種の波浪制御構造物の適切な開口部幅を提示するものである。ただし、入射波の方向は防波堤に直角な場合に限っている。

2. 対象構造物と検討方法

2.1 波浪制御構造物

検討の対象とした波浪制御構造物は、水平板付立体骨組構造、上部半円形断面構造、透過壁式二重セル構造の3構造である。図-1～3はこれらの概念図を示したものである。これらの3構造はいずれも水深50m程度の海底に直接設置する型式で、通水性を有する構造であり、波力に対しては基部ケーソンの重量で抵抗する。各構造の特徴および第1報で報告した反射、伝達特性の概要は以下に述べるとおりである。なお、伝達率の詳細については付図-1～3を参照していただきたい。

(1) 水平板付立体骨組構造（図-1）

本構造は水平板による消波効果を期待しており、これを立体骨組部材により水面下の適当な位置に支える構造である。水平板によるエネルギー消費のほか立体骨組部材によっても若干のエネルギー消費が期待できる。伝達率は水平板の幅 B および設置水深によって変化し、水深

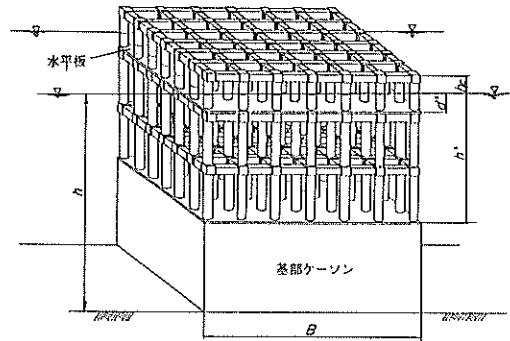


図-1 水平板付立体骨組構造

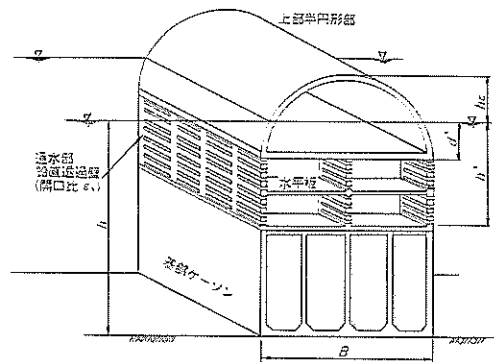


図-2 上部半円形断面構造

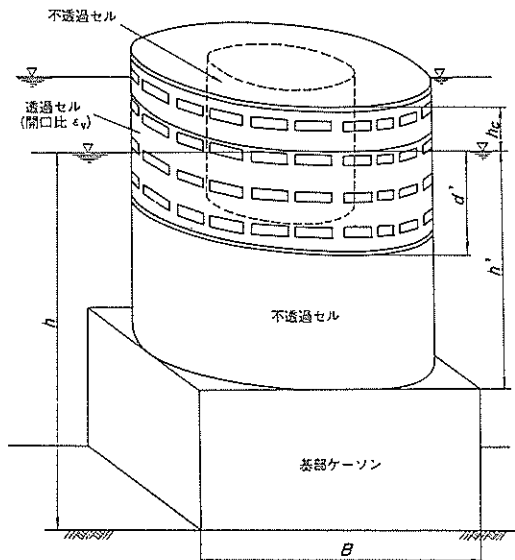


図-3 透過壁式二重セル構造

に等しい幅 ($B = 50\text{ m}$) の水平板を静水面下 3.75 m に設置したとき、伝達率 (K_T) は有義波周期 $T_{1/10} = 10 \sim 11\text{ s}$ で極小となり、極小伝達率は 0.3 である。反射率

(K_R)は $T_{1/3} = 12 \sim 13$ sで極大となるが、最大でも0.5であり全体に低反射である。この構造はこれらの他にも水平波力が非常に小さく流れをほとんど阻害しないという特徴を有する。

(2) 上部半円形断面構造 (図-2)

水面付近を安定性の面で優れた半円形断面とし、その下部は水平孔を有する通水部を設けた構造で、高さに比して狭い幅で安定性を高めようとするものである。伝達波は天端からの越波伝達波と通水部からの透過波のエネルギー合成で表すことができる。前者による伝達率は通常の直立壁の伝達率よりわずかに高い程度であり、後者による伝達率は開口比(ϵ_V) 0.25の鉛直壁を3枚設けたとき最大でも0.25程度である。反射率は0.7~0.9とやや高い。

(3) 透過壁式二重セル構造 (図-3)

二重セル(円筒)構造であり、このうち外側セルの水面付近は透過性を有しており、円筒構造による材料の節約を図りつつ水面付近での波力の緩和および遊水室による消波効果を狙っている。反射率は透過壁の開口比により異なり、周期が長いほど大きくなる傾向を示す。逆に伝達率はその影響をうけて $T_{1/3} = 6 \sim 17$ sの範囲では長周期の波ほど小さくなる傾向を示す。開口比(ϵ_V) 0.25で $T_{1/3} \geq 11$ sでは伝達率は0.4以下である。

なお、図中に示した諸元は以下のとおりである。

- h : 水深
- B : 構造物の幅
- h' : 基部ケーソン上面の深さ
- h_e : 天端高
- d' : 水平板の深さ(水平板付立体骨組構造)

上部半円形部下端深さ(上部半円形断面構造)

透過部下端深さ(透過壁式二重セル構造)

2.2 検討方法

(1) 合成伝達率

一般に、構造物の延長方向に開口部を有するときの背後での波は、構造物からの伝達波がなくて開口部のみがあるときの開口部からの回折波と、開口部を不透過部とみなし、構造物の存する箇所を開口部とみなしたときの伝達波による回折波の合成と考えることができる。本資料では、この構造物の存する箇所を透過部と呼び、前者を単に開口部からの回折波、後者を透過部の伝達波による回折波と呼ぶ。この二つの波は、前者の場合の入射波高を H_I とすると、後者の場合の入射波高が $K_T H_I$ となるだけで、取り扱いは同じである。

以上のように、構造物の背後域での波は回折波であるため、波高は場所的に変動する。しかし、波浪制御構造

物の効果としては、背後の適当な範囲(以後、波高検査域と呼ぶ)での平均的波高で評価することができる。これについては後章で詳述するが、本資料では構造物への入射波高に対する、この波高検査域での平均的波高の比を合成伝達率と定義し、これによって波浪制御構造物の効果を評価する。この合成伝達率は開口部からの回折波等の効果を断面的に置き換えたときの伝達率に相当し、開口部がない場合には構造物自体の伝達率に等しい。

(2) 検討の内容

本資料で検討の対象としたのは、図-4(1)に示しているように構造物の延長方向に間隔 l ごとに幅 l_G の開口部を有する配置(一列配置)で、これに直角に単一方向不規則波が入射したときの合成伝達率の算定法である。ただし、開口部からの回折波については同図(2)に示している千鳥配置についても計算を行っている。図中、 D は波浪制御構造物1かん(函)あたりの延長方向の長さ、 d は千鳥配置の場合の前列堤と後列堤の距離である。構造物延長方向の開口部の割合を表す開口率 ϵ は次式で定義される。

$$\epsilon = l_G / l \quad (1)$$

$$l = nD + l_G \quad (2)$$

ここに、 n は波浪制御構造物の l 区間でのかん数である。間隔 l は開口部を含めた波浪制御構造物の一単位長さを表し、以降配置幅と呼ぶ。

回折波の計算はすべて数値波動解析法^{2)~5)}によった。

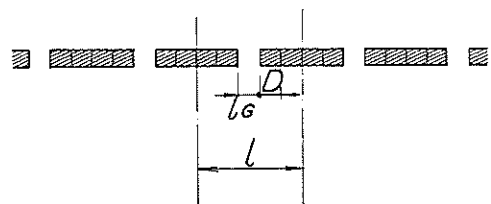


図-4(1) 防波堤の配置(一列配置)

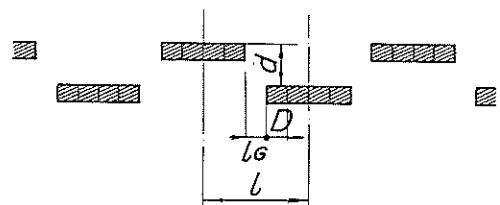


図-4(2) 防波堤の配置(千鳥配置)

この回折波を計算するに際して、まず配置幅の影響を調べた。これは同一開口率であっても、入射波の波長に対する開口部幅の比によって回折係数が異なることが予想されるので、外海における波浪制御構造物としての適当な配置幅をあらかじめ決めてしまうことを目的としたものである。

こうして選定した配置幅に対し、一列配置については開口率 ε を 0.2～0.8 の範囲で 4 通りに変化させ、千鳥配置の場合は $\varepsilon = 0.2, 0.6$ の条件でのみ前後列間隔 d と入射波波長 L の比 d/L を 0～0.5 の範囲で 3 種に変化させて数値波動解析法を適用して回折計算を行った。このうち、一列配置の $\varepsilon = 0.2 \sim 0.6$ の条件については水理実験により計算値の妥当性を確かめている。

以上は規則波による計算であるが、これらの結果を用いて不規則波合成を行い、不規則波に対する合成伝達率を求めた。さらに任意の伝達率の波浪制御構造物に対する所定の合成伝達率を満足する開口率の算定図を示し、2.1 で述べた 3 種の波浪制御構造物についての具体例を示した。

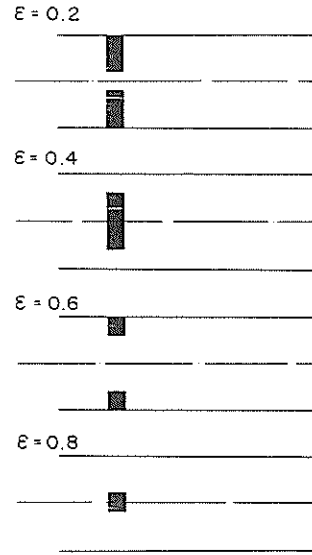


図-5(1) 計算に用いた防波堤の配置 (一列配置)

3. 数値波動解析法による計算

3.1 計算条件

数値波動解析法の理論及び計算方法の詳細は文献 2), 3), 4), 5) を参照されたい。ここでは本資料で実施した計算の条件について述べる。

(1) 対象とした防波堤の配置

本計算は、波浪制御構造物が設置される大水深海域を対象としているため、計算に用いる水深を 50 m とする。この水深において構造物（以降防波堤と呼ぶ。）の配置形状として図-5(1), (2) に示す 2 通りを対象とした。

一列配置については、開口率を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 の 4 通りとし、 $\varepsilon = 0.2, 0.6$ では開口部を計算メッシュ数の都合により計算領域の中央に設け、 $\varepsilon = 0.4, 0.8$ では計算領域の両端に設けた。また、千鳥配置については開口率 ε を 0.2, 0.6 の 2 通りとし、前後堤間隔は入射波波長との比で $d/L = 0.143, 0.286, 0.5$ の 3 通りとした。

(2) 計算領域

図-6 は計算領域を示したものである。同図上は配置幅が 150 m、下は配置幅が 300 m の場合である。計算領域の長さは 5 分で検討する波浪制御構造物の具体的計算例に使用する設計波 ($T_{1/10} = 14.0$ s) の有義波長に基づいて決めており、配置幅が 150 m、300 m の場合とも有義波長 $L_{1/10}$ の約 4.4 倍に相当する 1,140 m である。防波堤の位置は一列配置においては計算領域の沖側端より 480 m の地点とし、千鳥配置においては前列堤を一列配置と

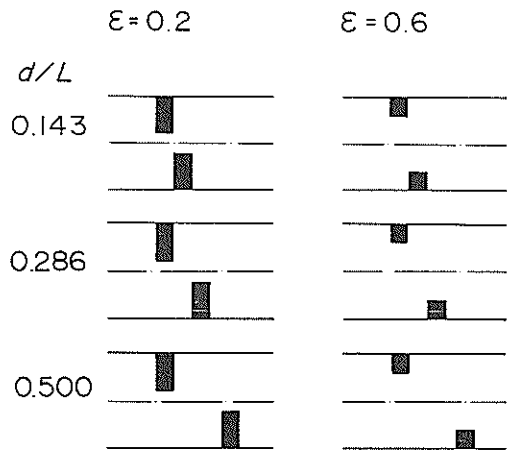
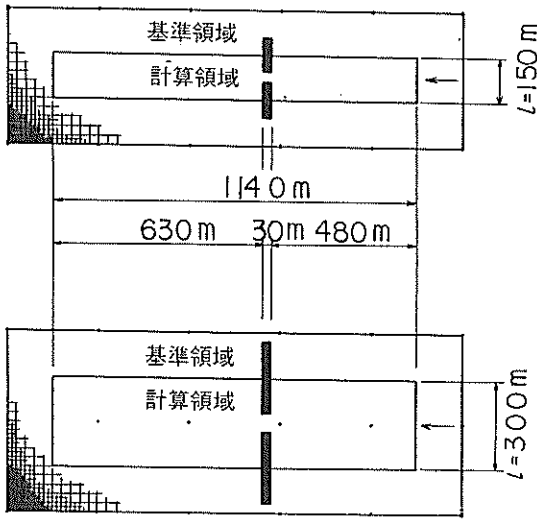


図-5(2) 計算に用いた防波堤の配置 (千鳥配置)

同じ地点に固定し、後列堤を堤内側に適宜間隔をおいて設置した。したがって、防波堤前側の計算領域の長さは設計有義波長の約 1.9 倍 (480 m)、防波堤後側の計算領域の長さは設計波波長の約 2.5 倍 (630 m) となる。なお、計算領域の両側方では波は完全に反射するものとし、計算領域の堤内側の端では波は完全に消波するものとした。また、防波堤の境界では波は完全に反射するものとした。

計算メッシュ間隔は入射波波長の関係から $\Delta s = 7.5$ m, 15.0 m, 30.0 m の 3 通りとした。計算に必要な水深デ



メッシュ間隔
 ■ 7.5 (m) ・水深データを与える点
 ■ 150
 ■ 300

図-6 計算領域

ータを与える点は図-6に示すとおりである。

(3) 入射波の条件と計算条件

表-1 検討の対象とした現地波浪条件

周 期 ($T_{1/3}$)	14.0 s
波 高 ($H_{1/3}$)	9.0 m
波 長 ($L_{1/3}$)	256.9 m
波形勾配 ($H_{1/3}/L_{1/3}$)	0.035
水 深 (h)	50 m

表-2 計算に用いた波と計算条件

周 期 T (s)	波 長 L (m)	メッシュ間隔 Δs (m)	1波当たりの メッシュ数	1波当たりの 時間分割	計算時間 (波)	計算時間間隔 Δt (s)	Δt_{limit} (s)	最大計算 ステップ
6.94	75	7.5	10	18	18	0.383	0.488	324
7.60	90		12	18	15	0.422	0.446	270
8.23	105		14	20	13	0.412	0.415	260
10.52	165	15.0	11	18	9	0.583	0.675	162
12.20	210		14	18	8	0.660	0.616	160
15.70	300		10	18	6	0.867	1.103	108
18.12	360	30.0	12	18	6	1.006	1.067	108

表-1は検討の対象とした現地波浪条件であり、表-2は計算に用いた入射波とその計算条件の一覧である。入射波は規則波とし、短周期から比較的長周期の波を含む範囲としたが、その周期は計算を適正に行うため計算メッシュ間隔の1.2倍程度の波長に対応する7種の周期を選定した。すなわち、計算メッシュ間隔 $\Delta s = 7.5$ m に対しては入射波周期(波長)は、6.9 s (75 m)、7.6 s (90 m)、8.2 s (105 m)、 $\Delta s = 15$ m に対しては10.5 s (165 m)、12.2 s (210 m)、 $\Delta s = 30$ m に対しては15.7 s (300 m)、18.1 s (360 m)である。また、計算時間間隔は、計算を適正に遂行するために式(3)で表される上限値が示されており、1周期の18等分程度の時間が最適である。したがって、これを基準として算定した。

$$\Delta t_{limit} = \frac{1}{c_{max}} \frac{\Delta s}{\sqrt{2}} \geq \Delta t \quad (3)$$

ここに

c_{max} : 計算領域内の最大波速

また、計算時間は入射波の第3波が計算領域の堤内側の端に到達するのに要する時間とした。したがって計算ステップ数は計算時間内に発生させる波数と1波当たりの時間分割数の積で求められる。

前述したように規則波の結果を合成することにより不規則波に対する堤内波高を推定することも可能であり、1列配置については5つの規則波の合成により不規則波に対する回折係数を推定する。この5成分波の周期の決定にあたっては、通常用いられている所要の有義波周期からそれを構成する成分波の代表周波数を決定する方法を参考にした。この方法は不規則波の持つスペクトルを等分割し、各区間での代表周波数を式(4)で求めるものである。

$$f_i = \frac{1}{0.9T_{1/2}} \left\{ 2.912M \left[\phi \left(\sqrt{2 \ln \frac{M}{i-1}} \right) - \phi \left(\sqrt{2 \ln \frac{M}{i}} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 $\phi(t)$ は次式の誤差関数、 M は不規則波の成分波数である。

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (5)$$

今回の計算では計算メッシュの関係および計算条件から入射波周期の選択に制約を受けるため、この方法で得られる周期に近い成分波として表-2の7種の規則波のうち $T = 6.94 \text{ s}$, 10.52 s , 12.20 s , 15.70 s , 18.12 s の5種を選定した。

(4) 計算の種類

表-3 配置幅の検討条件

検討内容	配置幅 l (m)	開口率 ϵ	波の条件	
			T (s)	L (m)
配置幅の効果	150	0.2 (一列配置)	6.94	75
			7.60	90
			8.23	105
			10.52	165
			12.20	210
			15.70	300
			18.12	360

表-4 一列配置の検討条件

検討内容	配置幅 l (m)	開口率 ϵ	波の条件	
			T (s)	L (m)
一列配置のと港内伝達率	150	0.2	6.94	75
		0.4	10.52	165
		0.6	12.20	210
		0.8	15.70	300
		0.8	18.12	360

表-5 千鳥配置の検討条件

検討内容	配置幅 l (m)	開口率 ϵ	前後堤間隔 d/L	波の条件	
				T (s)	L (m)
千鳥配置のと港内伝達率	150	0.2	0.143	12.20	210
			0.286		
			0.500		

表-3, 表-4, 表-5はそれぞれ今回検討を行った配置幅の効果、一列配置および千鳥配置の計算条件をまとめたものである。計算ケース数は、それぞれ14ケース、20ケース、および6ケースである。なお、表-4, 表-5の一列配置および千鳥配置の計算にあたっては配置幅 l を150mと一定としたが、これは配置幅の効果を検討した結果、 $l = 150 \text{ m}$ が適切であると考えられたためである。それらの詳しい内容は次節で述べる。

3.2 計算結果

(1) 配置幅の影響について

以下数値波動解析法による回折計算結果を示すが、本資料では2.2で定義した合成伝達率を求めることを最終目的としており、そのため開口部からの回折波についても特に場所的変動性を論ずる以外は開口部からの伝達波、また波高比(回折係数)についても伝達率と呼ぶ。

図-7は開口率 ϵ が0.2の一列配置の条件における配置幅の影響についての結果を示したものである。ここに、縦軸の \bar{K}_0 は堤体背後からの距離 x と入射波波長 L の比 x/L が1.0, 2.0, 3.0の防波堤の長さ方向に平行な線上での波高比を二乗平均して求めた値であり、平均伝達率と呼ぶ。これによると、 \bar{K}_0 の値は l の絶対値や x/L によって違いはあるものの、 l/L によって明らかに変動傾向があり、 $l/L \approx 1.5$ 付近で極大となっている。したがって、実際に配置幅を決定するにあたっては、入射波の条件を考慮して \bar{K}_0 が小さい範囲の l/L の値から配置幅を求めるべきである。

外海の大水深海域では、周期が10sを超えるような長周期波が卓越している。このような長期周期波に対して具体的な配置幅を検討すると、図-7の横軸の周期軸か

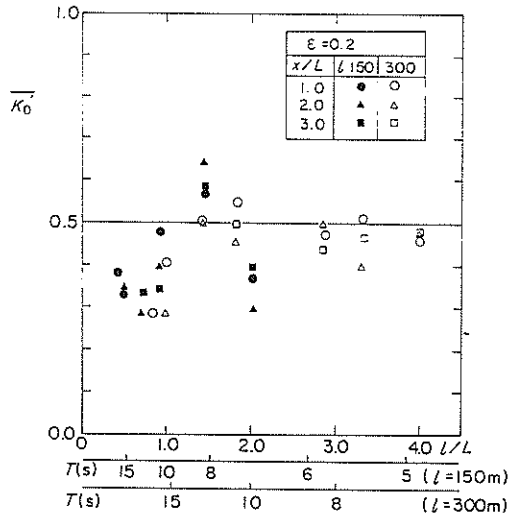


図-7 配置幅の効果

らわかるように配置幅が150mのときには $T=10$ sを超える範囲の \bar{K}_D は0.3~0.4であるのに対して、配置幅が300mのときには \bar{K}_D は0.3~0.65である。配置幅が300mのときには $l/L=1.5$ の \bar{K}_D が極大値をとる入射波の周期は約12sとなり、このような長周期波に対しては、堤内の伝達率が高くなるのがわかる。また、開口率が同じ条件で配置幅を大きくすると開口部幅も大きくなるため、そのような大きな開口部から波が侵入すると、堤内の広い範囲で局所的に波高が大きくなるなどの問題が生じると考えられる。したがって、本資料では配置幅が150m程度が適切であると判断して、次節以後に述べる一列配置および千鳥配置の伝達率の計算では、配置幅をすべて150mとした。

(2) 一列配置のときの伝達率

法線に開口部を設けて防波堤を設置したとき、堤内の回折波高は場所によって多少変動するため、このときの平均伝達率を堤体背面から堤内への距離 x と表-1に示す設計波の有義波長 $L_{1/3}$ の比 $x/L_{1/3}$ が0.5から1.5の範囲(検査域)のすべての波高比(回折波高/入射波高)の二乗平均と定義した。

図-8(1)~(5)は一列配置の条件において、こうして求めた平均伝達率を入射波の周期ごとに示したものである。横軸は開口比 ϵ 、縦軸は平均伝達率 \bar{K}_D である。平均伝達率 \bar{K}_D は図-8(1)の $T=6.9$ sの短周期の場合、その変化の傾向が他の周期の場合とやや異なっているが、全体的には開口比 ϵ が大きくなるにつれて滑らかに増加していることがわかる。

これらはいずれも防波堤が不透過な場合の開口部からの回折波に対する結果であるため、透過性の波浪制御構造物を実海域に設置したときの伝達率を推定するためにはさらに、透過部を通過する伝達波による回折波を考慮する必要がある。また、実海域の波は不規則波であるため、これを構成する多くの成分波についても同様に検討し、これらを重ね合わせる必要がある。以下にその方法について述べる。

図-9は透過性を有する防波堤をその延長方向に開口部を設けて設置した場合の波の伝播を概念的に示したものである。上図は防波堤開口部からの伝達波(回折波)、下図は防波堤透過部を透過する波による伝達波(回折波)のようすを示している。このように開口部を有する透過性防波堤の伝達率は開口部からの伝達波による伝達率と防波堤透過部からの伝達波による伝達率をエネルギー的に合成したもの(二乗和の平方根)と定義する。2.2ではこれを合成伝達率と名付けた。この場合、防波堤透過部からの伝達波は入射波高 H_I に防波堤自体の伝達率 K_T

を乗じた入射波高に対するものとして取り扱う。例えば、規則波に対して開口比 ϵ が0.2の場合の合成伝達率は図-8(1)~(5)に示す各規則波の計算結果を用いて、開口部から伝達する波については $\epsilon=0.2$ の \bar{K}_D の値を用い、防波堤透過部から伝達する波については $\epsilon=0.8$ の \bar{K}_D の値に K_T を乗じた値を用いて合成すればよい。

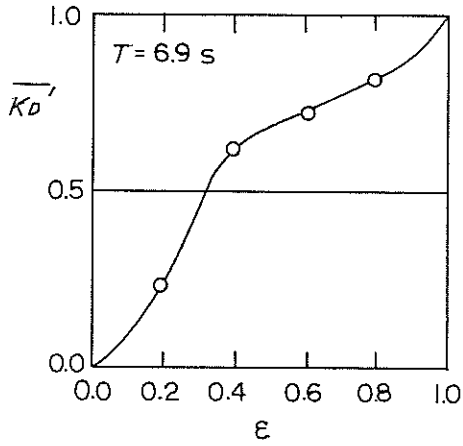
次に、不規則波に対する合成伝達率の算定法を以下に示す。不規則波に対しては、これを構成する成分波を規則波と考え、個別に上述の方法で求まる合成伝達率をさらに全成分波にわたって重みつきでエネルギー的に合成することにより求まる。このときの重みとしては、不規則波の持つ所要のスペクトルに対する各成分波が受け持つスペクトルの比(エネルギー分担率と呼ぶ)を用いればよい。図-10は、数値計算で対象としている不規則波のスペクトルとこれを構成する5成分波を模式的に示したものである。このときのスペクトル形としては式(6)に示す風波のスペクトル形として通常用いられているブレットシュナイダー・光島型スペクトルを用いた。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} \cdot f)^{-5} \times \exp[-1.03 (T_{1/3} \cdot f)^{-4}] \quad (6)$$

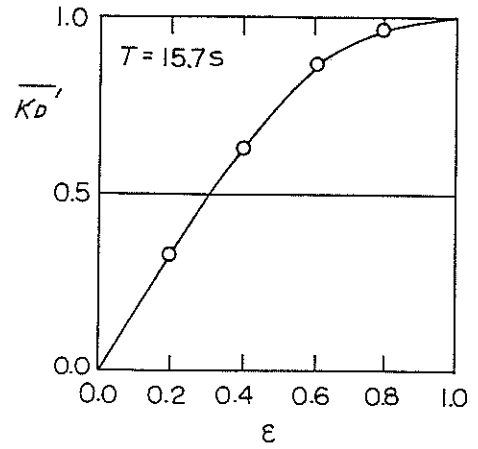
また、各成分波の受け持つ周波数範囲の上下限は隣接する成分波の周波数の平均値とした。図-10に示すように5つの成分波の重み(エネルギー分担率)は最も周波数が小さい成分波と大きい成分波でやや小さく、それ以外の3つの成分波でやや大きくなっている。これは成分波として用いた5つの規則波の周期が、数値波動解析法の計算条件の制約のため、均等なエネルギーを受け持つような周波数に対応する周期と一致させることができなかったためである。

ところで不規則波の場合、前報で報告したように不規則波を構成する成分波の伝達率は周波数によって異なり、その傾向は構造形式によっても異なっている。したがって本来ならば、前報で報告したスペクトル形の変化を表す指標の見掛け伝達率(K_T')を用いて、透過部からの伝達波の波高を成分波ごとに求めなければならない。しかし、これを考慮することは計算を繁雑とするため、ここではすべての成分波に対して同じ伝達率を仮定する。すなわち、透過部を透過した伝達波のスペクトル密度は入射波のすべての成分波のスペクトル密度に伝達率の二乗 K_T^2 を乗じたものと考えられる。

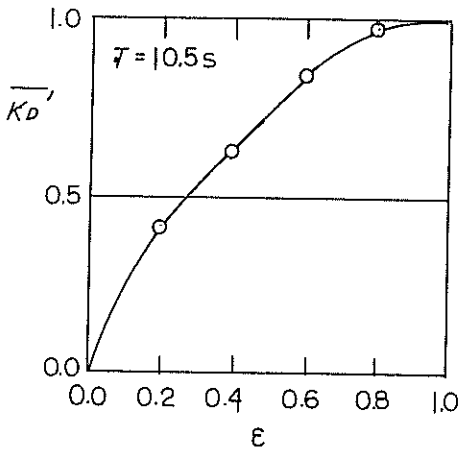
以上述べたことをまとめると、透過性防波堤をその延長方向に開口部を設けて設置したときの不規則波に対する合成伝達率は次式で与えられる。



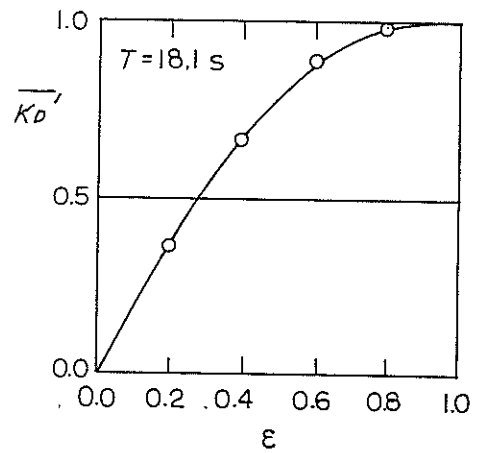
(1) (一列配置, $T = 6.9$ s)



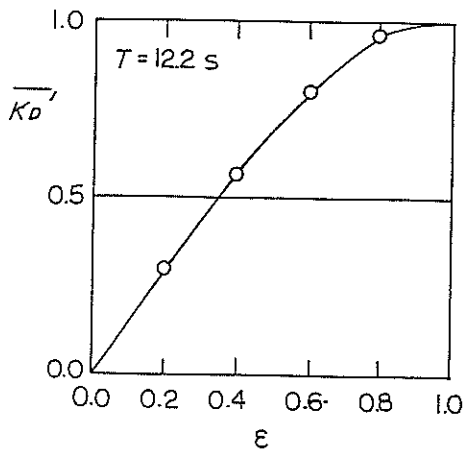
(4) (一列配置, $T = 15.7$ s)



(2) (一列配置, $T = 10.5$ s)



(5) (一列配置, $T = 18.1$ s)



(3) (一列配置, $T = 12.2$ s)

図-8 堤内の平均伝達率

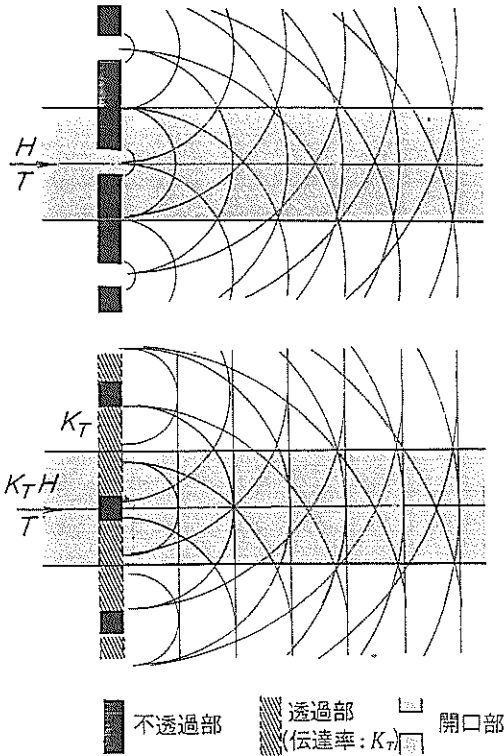


図-9 伝達波の伝播

$$\bar{K}_D(\varepsilon) = \left[\sum_{i=1}^m \{ \bar{K}'_{Di}(\varepsilon) \}^2 + \{ \bar{K}'_{Di}(1-\varepsilon) \}^2 K_T^2 w_i \right]^{1/2} \quad (7)$$

ここに、

$$\bar{K}'_{Di}(\varepsilon) = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \{ K_{Dj}(\varepsilon) \}^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$w_i = \frac{A_{sfi}}{A_{sa}} \quad (9)$$

$\bar{K}_D(\varepsilon)$: 開口率 ε のときの不規則波に対する堤内の合成伝達率

$\bar{K}'_{Di}(\varepsilon)$, $\bar{K}'_{Di}(1-\varepsilon)$: 開口率 ε あるいは $1-\varepsilon$ のときの成分波に対する堤内の平均伝達率

m : 不規則波を構成する成分波数

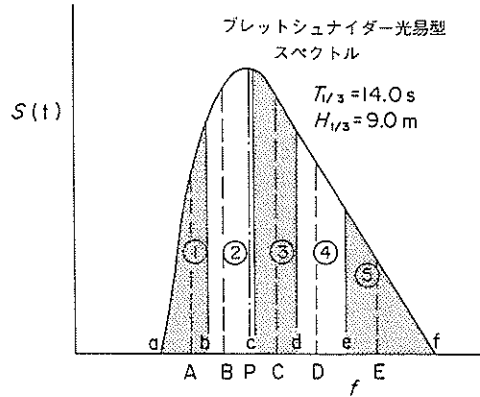
K_T : 透過性防波堤自体の伝達率

w_i : 各成分波の重み (エネルギー分担率)

$K_{Dj}(\varepsilon)$: 開口率 ε のときの検査域内における場所ごとの波高比

n : 検査域内における波高比算出点数

A_{sfi} : 成分波の受け持つエネルギー (スペクトル



成分波の代表周波数 (Hz)	成分波の境界周波数 (Hz)	スペクトル面積 (m ²)	重み w_i
0.0552 (A)	0.0236 (a)	0.595 (①)	0.118
0.0637 (B)	0.0595 (b)	1.360 (②)	0.270
	0.0729 (c)		
0.0820 (C)	0.0886 (d)	1.315 (③)	0.261
	0.1197 (e)		
0.0951 (D)		1.164 (④)	0.231
0.1442 (E)	0.3500 (f)	0.610 (⑤)	0.121

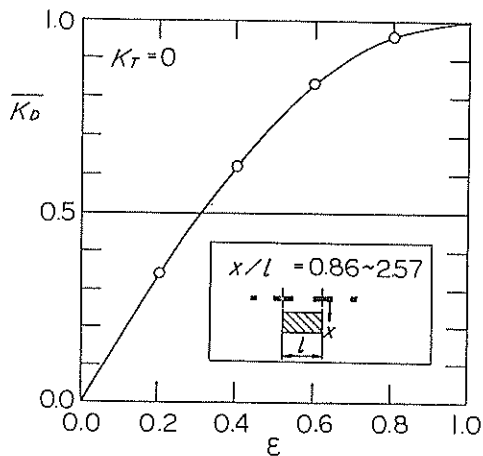
図-10 成分波のスペクトルに対する重み (エネルギー分担率)

ル面積)

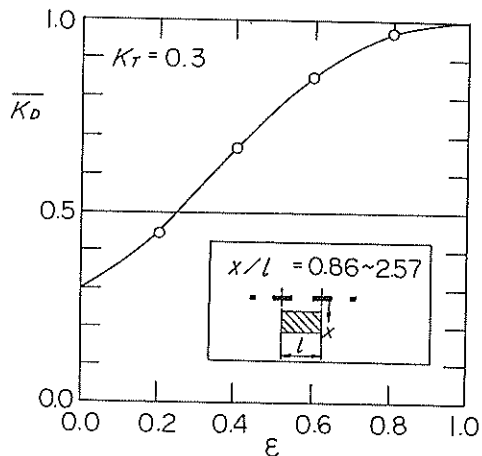
A_{sa} : 不規則波の全エネルギー (スペクトル全面積)

図-11 (1)~(6)は透過性防波堤自体の伝達率 K_T が0~0.5の6通りの条件で、不規則波に対する合成伝達率を式(7)を用いて求めた結果を示している。いずれも横軸は開口率 ε 、縦軸は不規則波に対する合成伝達率 \bar{K}_D である。 \bar{K}_D は開口率 ε が0のときすなわち開口部を設けないうときは防波堤自体の伝達率 K_T に一致し、開口率 ε が大きくなるにつれて滑らかに増加し、 $\varepsilon = 1.0$ すなわち防波堤がない状態では当然のことながら1.0となる。なお、図中に示す検査域の範囲は $x/L_{1/2} = 0.5 \sim 1.5$ に対応するものである。

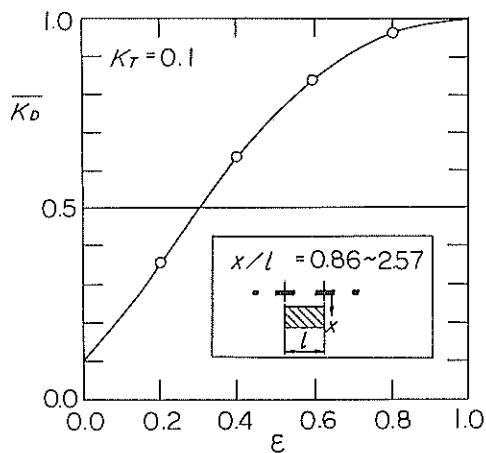
防波堤自体の伝達率 K_T が既知の防波堤により所定の合成伝達率 \bar{K}_D を与えるために必要な開口率 ε の算定には図-11 (1)~(6)を用いれば良いが、若干の不便を感じるため、これらを基に横軸に K_T とした所要開口率算定図(図-12)を作成した。図中のパラメーターは所要とする合成伝達率 \bar{K}_D である。使用にあたっては、防波堤自体の伝達率 K_T から鉛直上方に垂線をのびし、所要とする合成伝達率を示す曲線との交点の縦座標を読み



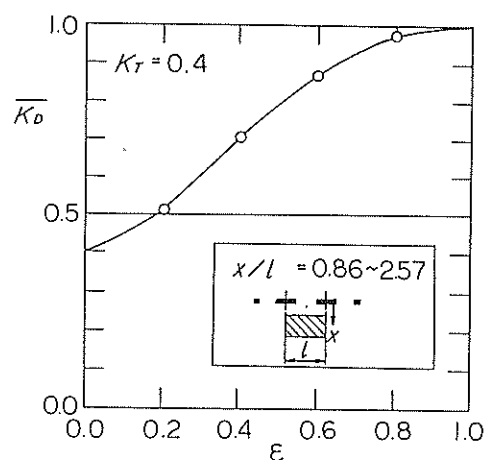
(1) (一列配置, $K_T = 0$)



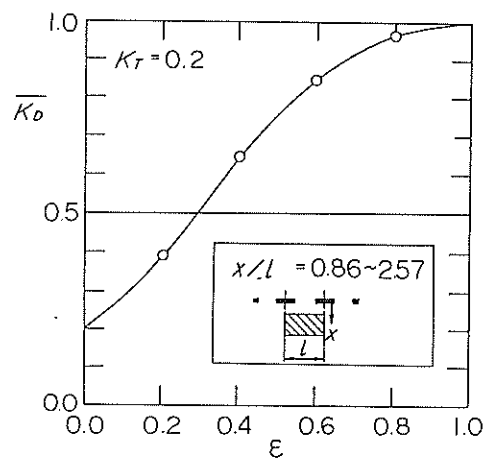
(4) (一列配置, $K_T = 0.3$)



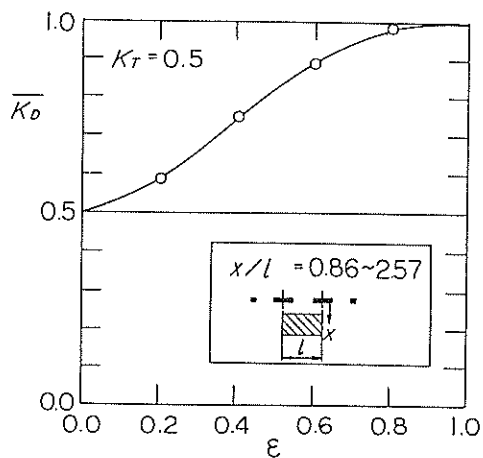
(2) (一列配置, $K_T = 0.1$)



(5) (一列配置, $K_T = 0.4$)



(3) (一列配置, $K_T = 0.2$)



(6) (一列配置, $K_T = 0.5$)

図-11 不規則波に対する堤内の合成伝達率

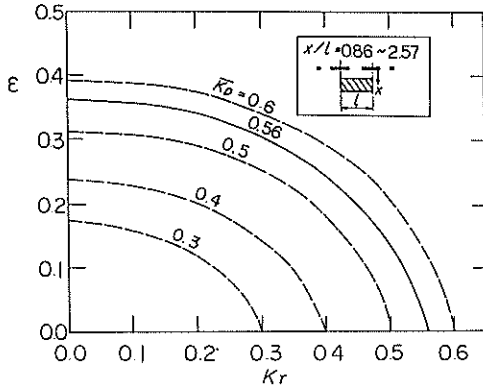


図-12 所要開口率

よい。例えば、 K_r が 0.4 の透過性防波堤を用いて、合成伝達率を 0.5 とする開口比は 0.17 となる。なお、図中には \bar{K}_D が 0.56 となる曲線も示しているが、これは本資料が対象としている 3 種の波浪制御構造物の具体的な配置の計算に使用するものである。

(3) 千鳥配置のときの伝達率

図-13 は千鳥配置のときの堤内の場所的な伝達率の変化を調べたものである。横軸は後列の防波堤背面から堤内側への距離 x と入射波長 L の比 x/L 、縦軸は x/L が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の位置での防波堤延長方向の回折係数（波高比）の二乗平均から求めた平均伝達率 \bar{K}_D' である。パラメータは防波堤の前後間隔 d と入射波波長 L の比 d/L である。 \bar{K}_D' は堤内位置によって変化しており、平均伝達率の平面的な分布の変動が若干存在している。

図-14 は横軸に d/L をとり、一列配置のときと同

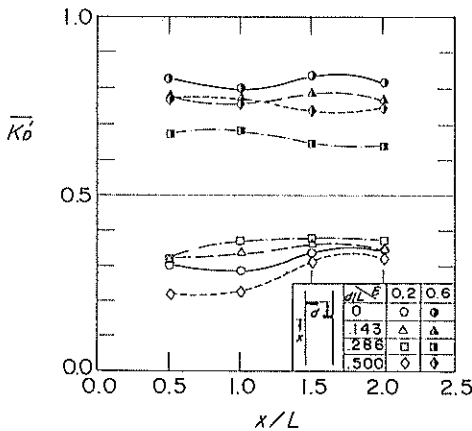


図-13 堤内の伝達率の場所的な変化（千鳥配置）

様に求めた検査域 ($x/L_{1/3} = 0.5 \sim 1.5$) の範囲内における平均伝達率 \bar{K}_D' を示したものであり、パラメータは開口率 ϵ である。千鳥配置のときに平均伝達率を最小にする前後堤間隔は、開口率により異なっており、 $\epsilon = 0.2$ のとき $d/L = 0.5$ ($\bar{K}_D' = 0.25$)、 $\epsilon = 0.6$ のとき $d/L = 0.286$ ($\bar{K}_D' = 0.67$) である。このように、千鳥配置の場合、平均伝達率は一列配置よりやや小さくなる条件が存在する。そこで、千鳥配置の伝達率に対する効果をさらに詳しく調べるために、 $\epsilon = 0.2$ の $d/L = 0$ 、と 0.5、 $\epsilon = 0.6$ の $d/L = 0$ と 0.286 の場合について、堤周辺および堤内の波高（入射波高で無次元化）の分布を求めた。図-15 (1)~(4) はこれらを示したものであるが、 $\epsilon = 0.2, 0.6$ の場合とも堤内の波高比の分布は、千鳥配置のほうが一列配置よりも複雑に変化しており、平均伝達率 \bar{K}_D' の計算範囲における波高比は、千鳥配置のほうが一列配置よりもやや小さくなっている。また、千鳥配置では前列および後列の防波堤前面で波高比が 2.0 以上となっており、防波堤からの波の反射が大きく、そのために堤内の伝達率が小さくなっていると推察できる。以上に述べたように、千鳥配置の場合は一列配置の場合より伝達率が小さくなる傾向があると言えるが、今回の検討では開口率が $\epsilon = 0.2, 0.6$ 、入射波が $T = 12.2$ s の規則波というごく限られた条件の結果が得られたにすぎず、他の条件、特に入射波が不規則波であるような場合を含めた一般的な結論は導けない。また、防波堤が透過性の場合には防波堤を透過する伝達波についても同様な検討が必要となってくる。

本資料で対象とした波浪制御構造物は、今後、マウンド設置型についても検討を進める予定であり、マウンドを設ける場合千鳥配置では多量のマウンド材が必要とな

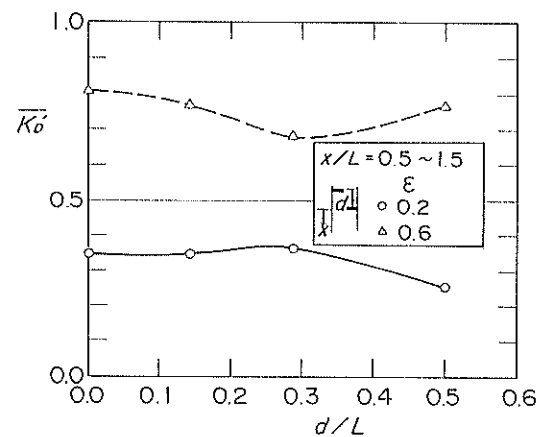
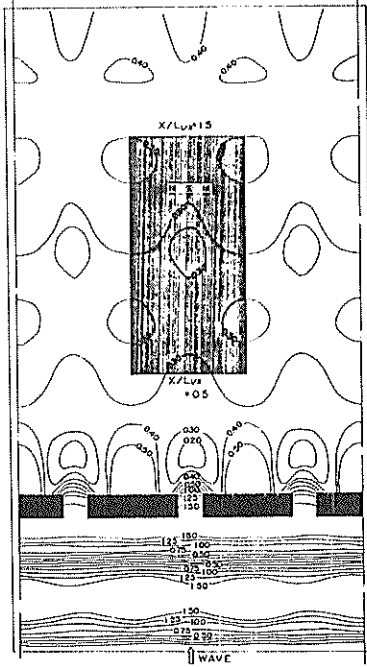
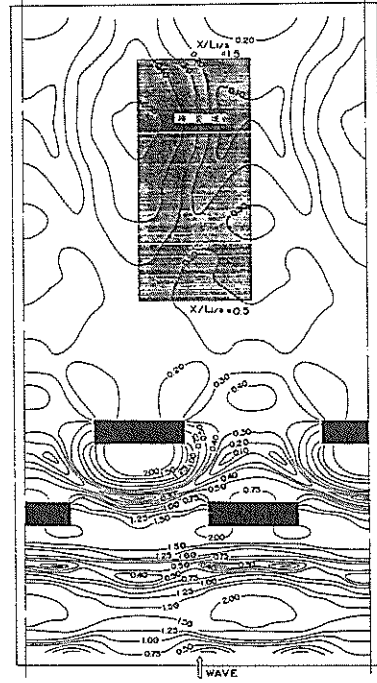


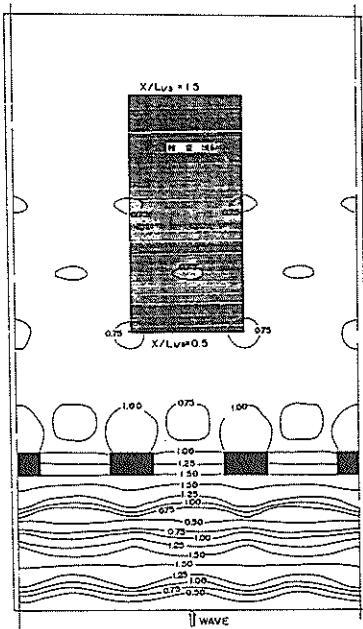
図-14 前後堤間隔の効果



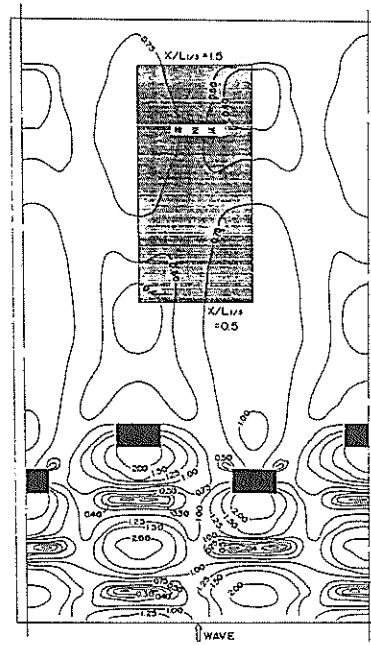
(1) ($\epsilon = 0.2, d/L = 0$)



(2) ($\epsilon = 0.2, d/L = 0.500$)



(3) ($\epsilon = 0.6, d/L = 0$)



(4) ($\epsilon = 0.6, d/L = 0.286$)

図-15 伝達率の分布

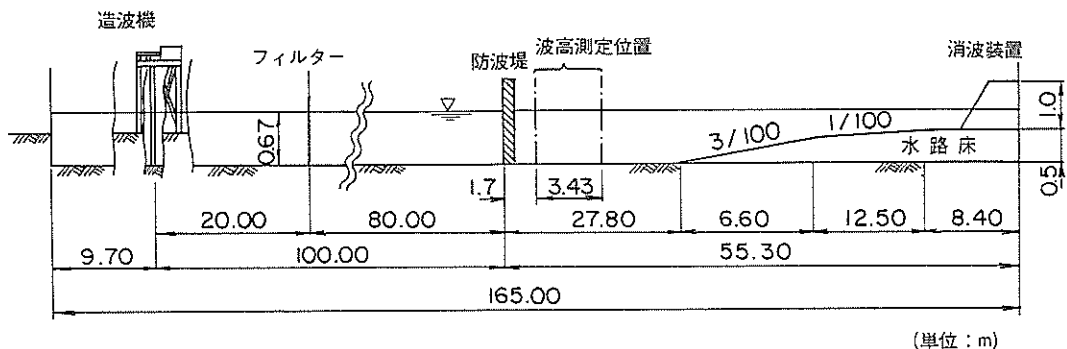


図-16 実験水路

るなどの新たな問題が生じることが考えられるため、今回の千鳥配置に対する検討は一列配置と比較する程度にとどめた。

4. 水理実験による検討

4.1 実験条件

(1) 実験水路と堤体模型

実験には図-16に示す当研究所所有の不規則波長水路を用いた。当水路は全長165m、水路幅1m、深さ1.5mである。水路床は造波板より127.8mから134.4mまでは3/100、134.4mから146.9mまでは1/100勾配で設置しており、その後は水路端まで水平となっている。また、水路端には反射波を減じる目的で消波装置を設置している。造波機は最大ストローク±40cmの低慣性直流電動機駆動によるピストン型造波機である。

堤体模型の設置位置は造波板より100mの地点であり、この部分は水路片面がガラス張りとなっているため側方からの観察が可能である。

実験縮尺は1/75とした。これは数値計算における配置幅150mの片側75mを水路幅1mに換算する縮尺である。

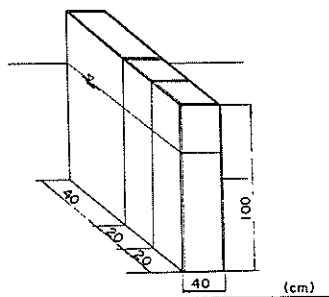


図-17 堤体模型

堤体模型としては、10mm厚の合板および角材により箱状の完全反射性の堤体を製作し、鉛製重錘を用いて水路内に固定した。模型寸法は図-17に示すように数値計算における防波堤の条件に対応する値である。模型の高さは越波を防ぐため十分高くした。防波堤の開口部は水路ガラス壁面側に設けており、堤体模型を3体用意して開口比を変化させた。

(2) 実験波

実験波は数値計算で用いた5種類の規則波のうち、水路内の波の安定性を考慮して最も周期の短い6.9sを除く10.5s、12.2s、15.7s、18.1s(現地量)の4種類とした。波高は波形勾配を0.035とする値とし、それぞれ、5.78m、7.35m、10.5m、12.6m(現地量)である。また、本資料で検討の対象とする有義波周期14.0s(現地量)の不規則波についても実験を行った。この不規則波はブレットシュナイダー・光易型のスペクトル形を持つものとし、有義波波高は9.0m(現地量)である。実験水深は数値計算に用いた大水深の50m(現地量)である。したがって、実験縮尺1/75に対する実験波諸元(目標値)は規則波の場合、周期が1.21s、1.41s、1.81s、2.09s、波高はそれぞれ7.7cm、9.8cm、14.0cm、16.8cmであり、不規則波の場合、有義波周期が1.62s、有義波高が12.0cmである。また、水深は66.7cmである。

これらの周期を持つ実験波を作成するにあたっては、まず造波信号の造波機への入力レベルに発生波高の関係を調べる通過波高検定を行った。この通過波高検定は堤体を設置しない状態において堤体設置予定地点における発生波高(通過波高)を測定するものであり、模型設置予定地点で1点、およびこの点を中心として沖側、岸側にそれぞれ入射波波長の1/4、1/2の地点に2点ずつの合計5点にて発生波高を測定した。造波機の駆動、測定

データの取得および解析は、後述するREMS⁷⁾(Real time Experiment Managing System)によった。データの取得は規則波の場合には模型堤体を設置したときに堤体から反射した波が再び堤体位置に戻ってくるまでの間の10波とし、不規則波の場合には再反射の影響

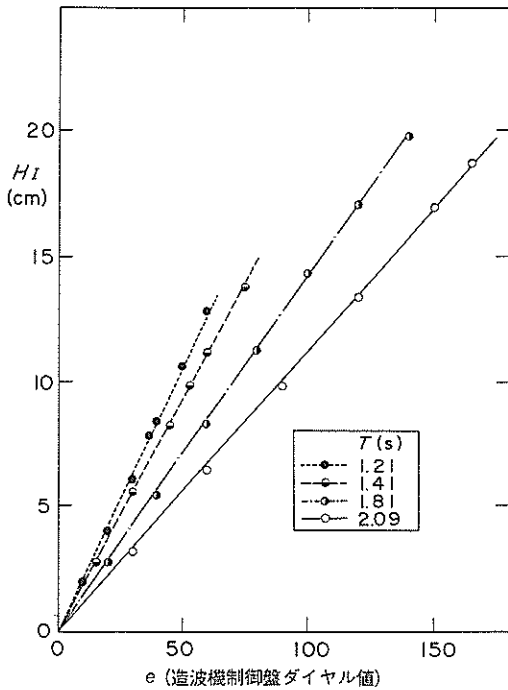


図-18 通過波高(規則波)

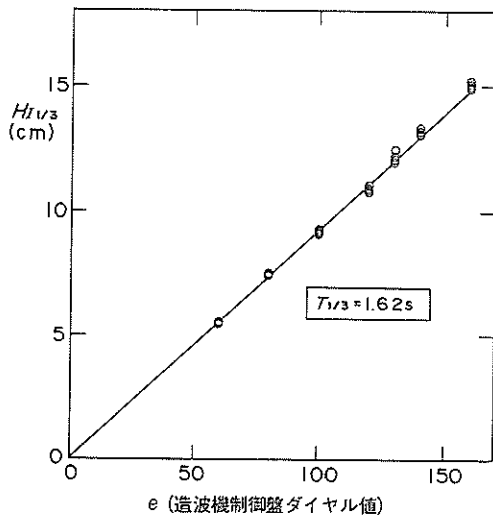


図-19 通過波高(不規則波)

を考慮して十分に定常状態に達した後の約200波とした。この定常状態に達するまでの所要待ち時間はこの水路に関して既に報告⁸⁾されており、これに基づいて本実験では造波開始後、有義波群速度の波の到達時間の約6倍に相当する600sとした。

図-18、図-19はそれぞれ規則波、不規則波の通過波高を示すものである。横軸は造波板の変位量を制御するダイヤルの値であり、これを大きくすることにより入力信号の基準電圧を増幅することができる。各波ともダイヤル値に対してほぼ直線的に通過波高が増大していることがわかる。不規則波の場合、通過波高検定の結果得られた有義周期は1.64sと目標有義波周期と若干異なっており、以後のデータ整理にあたっては通過波高検定の結果を用いる。

図-20は不規則波のスペクトル形を示したものであり、横軸、縦軸はそれぞれ $T_{I/3}$ 、 $H_{I/3}^2 T_{I/3}$ で無次元化してある。目標スペクトル形は図中実線で示すプレットシュナイダー・光易型の標準スペクトル形であるが、通過波のスペクトルは高周波数側でスペクトル密度がやや小さくなっている。この傾向は前報⁹⁾で報告した不規則波実験でも見られた傾向であり、側壁等との摩擦による当水路固有の現象と考えられる。したがって、本実験でもこの不規則波をそのまま使用することとした。なお、図中に示した有義波高12.18cmは通過波高検定の5点の平均値であり、以後、不規則波の入射波高としてはこの値を用いる。

また、不規則波実験では水路内が多重反射系を形成し

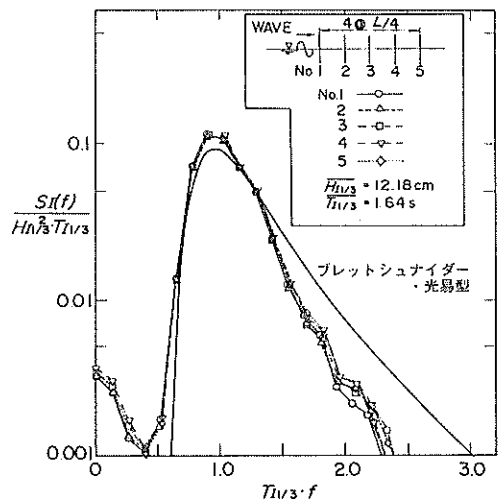


図-20 実験波スペクトル

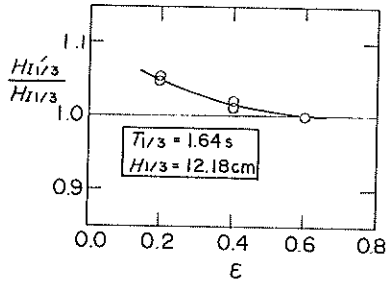


図-21 再反射波による入射波高の増加

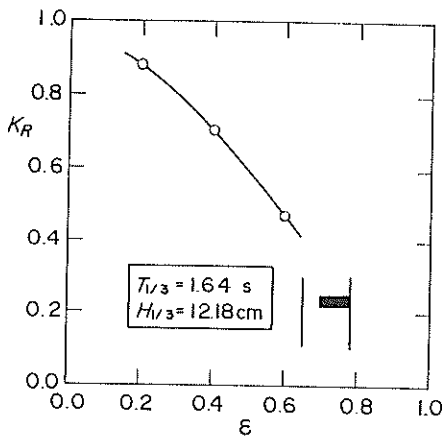


図-22 堤体の反射率

定常状態に達してから実験を行うため、このときの入射波高の増大を検討しておく必要がある。そこで、堤体模型を設置した状態で不規則波を作用させ、定常多重反射系に到達した時点で和田¹⁰⁾らの提案した入射波の分離計算を行い分離入射波を求めた。図-21、図-22はその結果を示したものであり、前者は分離入射波高と通過波高の比 H_{I1}/H_{I0} 、後者はそのときの反射率 K_R を開口率 ϵ に対して描いたものである。開口率 $\epsilon = 0.6$ と大きいときは K_R は 0.47 に対して H_{I1}/H_{I0} は 1.00 であり、分離入射波高は通過波高に等しいが、開口率が $\epsilon = 0.4$ 、 0.2 と小さくなるにつれて、 K_R は増大し、 H_{I1}/H_{I0} も 1.02、1.05 と若干大きくなっている。そこで、 $\epsilon = 0.2$ 、 0.4 については再反射波の影響を考慮することとし、データ整理に用いる入射波高は、それぞれの分離入射波高の 12.80 cm、12.37 cm とした。

表-6 は実験に使用した実験波の一覧である。

表-6 実験波一覧

波の種類	水深 h (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波長 $L_{0.5}$ (cm)	$h/L_{0.5}$	波高 $H_{1/3}$ (cm)	$H_{1/3}/L_{0.5}$
規則波	66.7	1.21	220.0	0.303	7.7	0.035
		1.41	280.0	0.238	9.8	
		1.81	400.0	0.167	14.0	
		2.09	480.0	0.139	16.8	
不規則波		1.62	342.5	0.197	12.0	

表-7 実験ケース一覧

波の種類	$T_{1/3}$ (s)	ϵ
規則波	1.21	0.2
	1.41	
	1.81	
	2.09	
	1.21	0.4
	1.41	
	1.81	
	2.09	
不規則波	1.21	0.6
	1.41	
	1.81	
	2.09	
不規則波	1.64	0.2
		0.4
		0.6

(3) 実験の種類

表-7 は実験ケースを示したものである。防波堤の開口率は伝達率がほとんど 1.0 に近いと考えられる $\epsilon = 0.8$ を除く $\epsilon = 0.2$ 、 0.4 、 0.6 の 3 種類とした。各開口率に対して前節で述べた 4 種類の規則波と 1 種類の不規則波を用いた。

4.2 測定および解析方法

(1) 測定方法

防波堤開口部からの伝達波高の測定位置は、図-23 に示すように防波堤背面から堤内側へ、不規則波有義波周期に対する波長の 0.5 ~ 1.5 倍の範囲(数値計算における検査域に相当)における 9 測線上とし、各測線上には水路幅方向に 10 cm 間隔で 11 か所の測点を設けた。したがって、1 実験ケース当たり 99 測点にて波高データを得た。

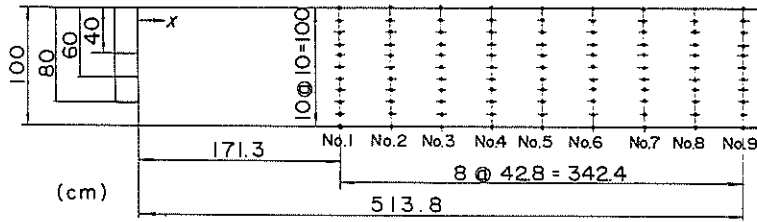


図-23 伝達波の測定位置

伝達波高は容量式波高計を用いて測定し、ローパスフィルターにより電気的なノイズをカットした上でデータレコーダーに記録した。

(2) 解析方法

防波堤開口部からの伝達波は、回折を伴って港内側に広がり、水路両側壁で反射を繰り返して多重反射系を形成する。開口部を通過するとき高次波が発生したり、水路横断方向に進行する回折波により横波が励起されるため、波形はこれらが合成され乱れたものとなる。この波形の乱れは、特に規則波の場合に顕著に目立ち、測定位置によっては通常ゼロアップ解析では高次波を1波として解析することがある。そこで、本実験では規則波に対する各測点での波高を以下に示す2通りの方法で解析した。ひとつは図-24に示すように規則波の1周期に相当する時間内における正負のピーク値の差を波高とする方法である。他の方法は、規則波による回折波を各測点ごとにスペクトル解析し、回折波に含まれる基本周波数成分波の波高を求めるものである。後者の方法における具体的な算定方法を以下に示す。

水位波形をスペクトル解析して得られる各周波数成分のスペクトル密度のうち、基本周波数成分波のスペクトル密度を $S(f)$ 、その成分波が受け持つ周波数範囲を Δf とすると、その成分波の持つエネルギー E は次式で表せる。

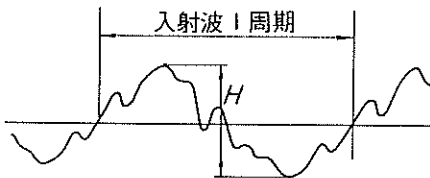
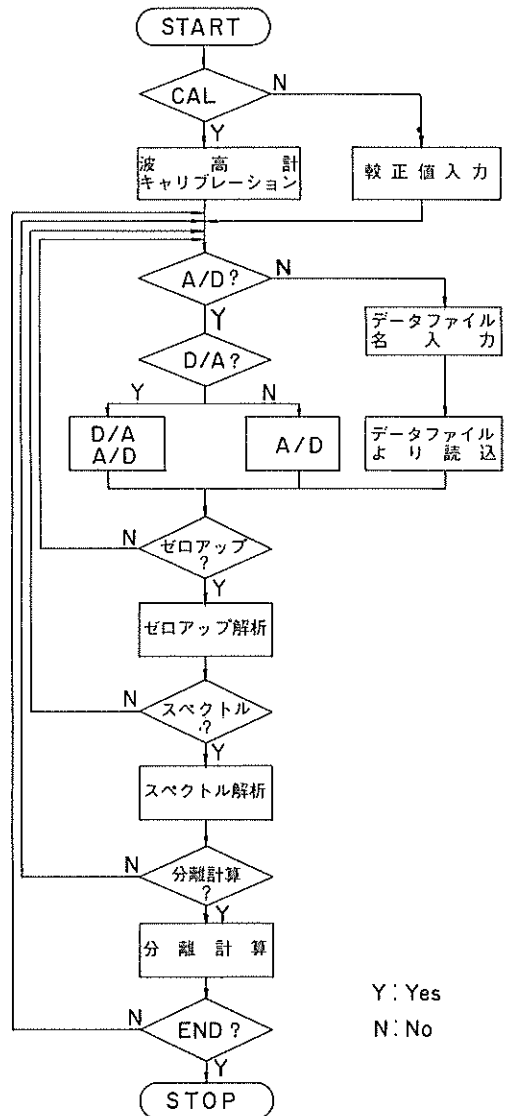


図-24 伝達波高の定義(規則波)



Y: Yes
N: No

図-25 実験波の制御解析プログラムフロー⁷⁾

表-8 計測および解析条件

波の種類	周期 $T_{F(1/3)}$ (s)	造波機制御盤 ダイヤル値	待ち時間 (s)	サンプリング 周波数 (Hz)	サンプリング データ数	フィルター カットオフ 周波数(Hz)
規則波	1.21	37	125	76.681	1,024	10
	1.41	53	115	66.069		
	1.81	98	100	51.375		
	2.09	150	95	44.477		
不規則波	1.64	130	600	14.073	4,096	40

$$E = w_0 S(f) \Delta f \quad (10)$$

この波の持つエネルギー E はこの周波数の範囲を代表させる規則波を考えると次式で表される。

$$E = \frac{1}{8} w_0 H^2 \quad (11)$$

したがってこの成分波の波高は式(11)で求められ、そこでの波高比 K_D は入射波高 H_I に対して式(12)で求められる。

$$H = 2\sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (12)$$

$$K_D = \frac{H}{H_I} = \frac{2\sqrt{2S(f)\Delta f}}{H_I} \quad (13)$$

不規則波の解析では、約200波を対象として、堤内における各測点での波高算定には通常用いられるゼロアップ解析を行い、これより求まる有義波高 $H_{1/3}$ を用いた。式(14)に示すように再反射波の影響を考慮した入射波有義波高 $H_{I1/3}$ に対する比で各測点での波高比を定義した。

$$K_D = H_{1/3} / H_{I1/3} \quad (14)$$

また、不規則波の解析においても高次波や横波の影響をみるためスペクトル解析を行った。

実験波の制御と解析は、造波信号の作成、出力および測定波のゼロアップ解析、スペクトル解析、入射波の分離計算をオンラインで行うREMSによった。図-25はその処理フローを示したものである。本システムは当研究所所有のコンピューターシステムNOVA 4/X(日本データゼネラル社製)内に登録されている。なお、このシステムの詳細については文献7)を参照されたい。

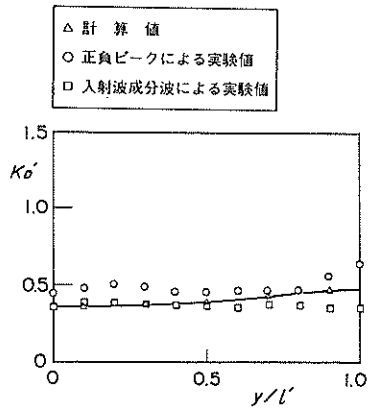
各実験波に対する解析の条件は表-8に示すとおりである。サンプリングデータ数は規則波で1,024個、不規則波で4,096個とし、サンプリング時間間隔は各実験波の測定時間に応じて決定した。

4.3 実験結果

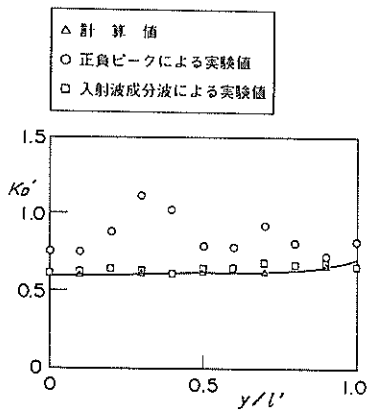
図-26~28の(1)~(4)は規則波に対する防波堤背後

$x/L_{1/3}=1.0$ の位置における実験値と計算値を各実験波ごとに比較したものである。横軸は開口部側水路壁からの水路横断方向の距離 y と水路幅 l' の比 y/l' である。図中には実験値として1周期間の正負の最大ピーク値より求まる波高比と入射波周期の成分波の波高から求まる波高比を示している。また、併せて数値波動解析法による数値計算結果も示している。ここに示すように、入射波周期の成分波から求まる波高比は、入射波の周期が短いときに場所によってその変化の傾向を異にする場合もあるが、全体としては計算値とよく一致している。しかし、1周期間の正負の最大ピーク値から求めた波高比は、すべての場合で計算値より大きくなっている。この理由としては、数値計算では波の非線型性を考えておらず、したがって高次波の影響は考慮していないのに対して、この解析ではそれらも含めた合成波について、その正負の最大ピーク値から得られる波高を用いていることがあげられる。

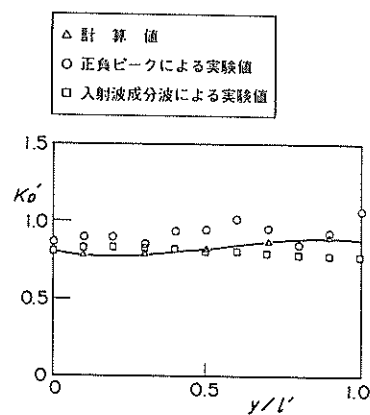
既に述べたように高次波には、波の非線型性により入射波が開口部を通過する際に発生するものと水路横断方向に進行する波によって励起される横波があると考えられるが、特に後者について以下に述べる。横波としては、図-29に示すように水路幅を半波長、1波長……とする波が考えられるが、主として基本周波数(水路幅を半波長とする波)が卓越すると思われるので水路両側壁部と水路中央部の測定波に対してスペクトル形を比較検討した。検討した条件は横波が発生しやすいと考えられる ϵ が0.2の場合で、入射波周期が1.81s(0.55Hz)、2.09s(0.48Hz)の規則波の2ケースである。図-30(1)、(2)はそれぞれ1.81s、2.09sに対応するものであり、スペクトルの測定位置は防波堤背面から1波長離れた地点の両水路壁と水路中央の3点である。横軸の周波数は入射波周波数の約3倍までの周波数を示している。これらの図から各測定位置とも入射波の周波数および2倍、3倍周波数で明瞭なピークが見られるほか、周波数 $f=0.87\text{ Hz}$ 、 1.25 Hz でもピークが現れていることがわ



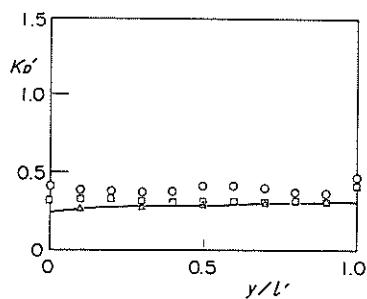
(1) ($\epsilon = 0.2, T_I = 1.21 \text{ s}$)



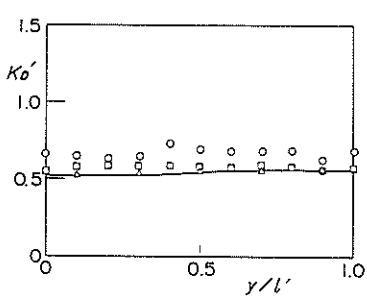
(1) ($\epsilon = 0.4, T_I = 1.21 \text{ s}$)



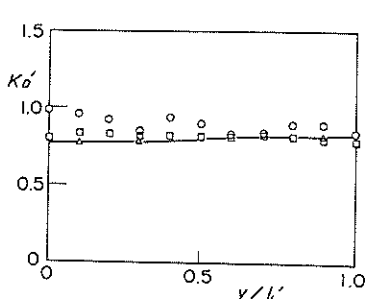
(1) ($\epsilon = 0.6, T_I = 1.21 \text{ s}$)



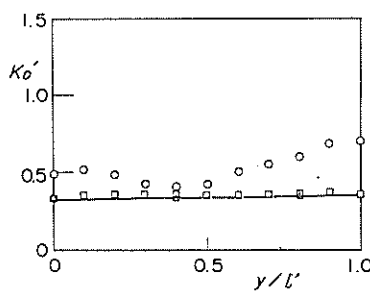
(2) ($\epsilon = 0.2, T_I = 1.41 \text{ s}$)



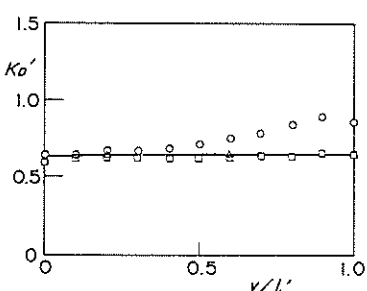
(2) ($\epsilon = 0.4, T_I = 1.41 \text{ s}$)



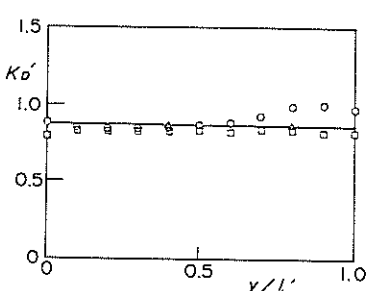
(2) ($\epsilon = 0.6, T_I = 1.41 \text{ s}$)



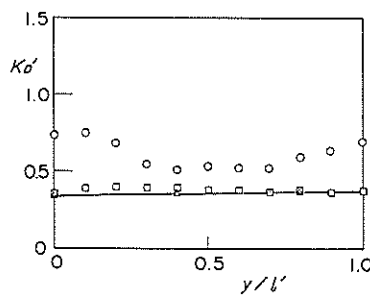
(3) ($\epsilon = 0.2, T_I = 1.81 \text{ s}$)



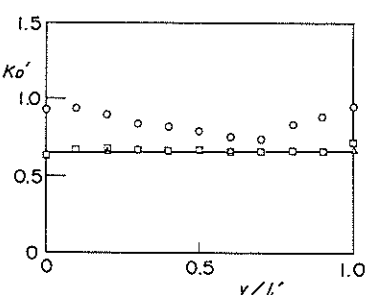
(3) ($\epsilon = 0.4, T_I = 1.81 \text{ s}$)



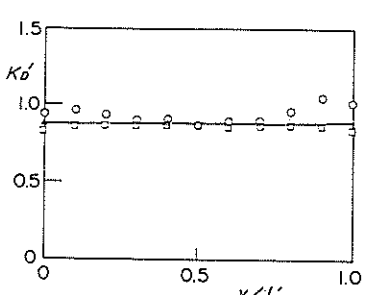
(3) ($\epsilon = 0.6, T_I = 1.81 \text{ s}$)



(4) ($\epsilon = 0.2, T_I = 2.09 \text{ s}$)



(4) ($\epsilon = 0.4, T_I = 2.09 \text{ s}$)



(4) ($\epsilon = 0.6, T_I = 2.09 \text{ s}$)

図-26 規則波の実験結果

図-27 規則波の実験結果

図-28 規則波の実験結果

かる。この周波数は横波の基本周波数および2次周波数と一致するものである。すなわち、水深6.67 cmに対して $L/2$ 、 L が水路幅の1 mに等しい波によるピークである。特に、 $T_I = 2.09$ sの条件で水路両側壁 ($y/l' = 0.0, 1.0$)においては入射波の2倍周波数が基本周波数とほぼ一致しているため、この周波数のスペクトル密度は基本周波数の密度より大きくなっている。このことは図-26(3),(4)において水路両側壁付近での波高比の増大傾向が $T_I = 1.81$ sの場合よりも $T_I = 2.09$ sの場合が顕著であることと一致するものである。このように、水路内には水路幅によって拘束される横波が発生していることがわかったが、このような現象が今回行った実験のように、狭い断面水路を用いて行ったために発生した水路固有の現象であるか否かは明らかでない。なぜなら、法線方向に無限に広い空間を考えても、実験で水路壁に相当する面には左右両側から同振幅、同位相の波が完全に対称に入射し、面に垂直方向の流速成分は存在しないことになる。この現象はそこに鉛直壁があり、そこで完全反射が生じていることと同じである。すなわち実験で水路壁があることと同じであると考えることができる。したがって、実際の現象においても、実験では水路幅に相当する配置幅の半分の長さを半波長、1波長、1.5波長……とする横波が存在することが考えられる。

このように防波堤開口部からの伝達波には波の非線形性から生じる高次波成分や横波が含まれることが考えられるが、一般的にはこれらの波の持つエネルギー量は小さく、かつ高周波側へエネルギーが移行することによりパワーは小さくなるため、これらの影響は小さいと考えられる。したがって、基本周波数成分の振幅から求まる波高分布が数値計算結果と非常によく一致している

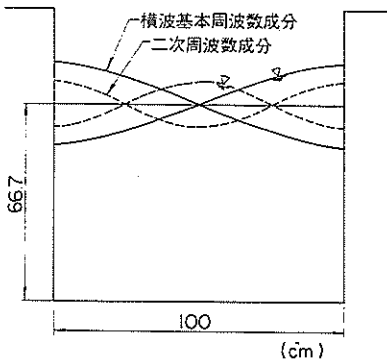


図-29 水路内の横波

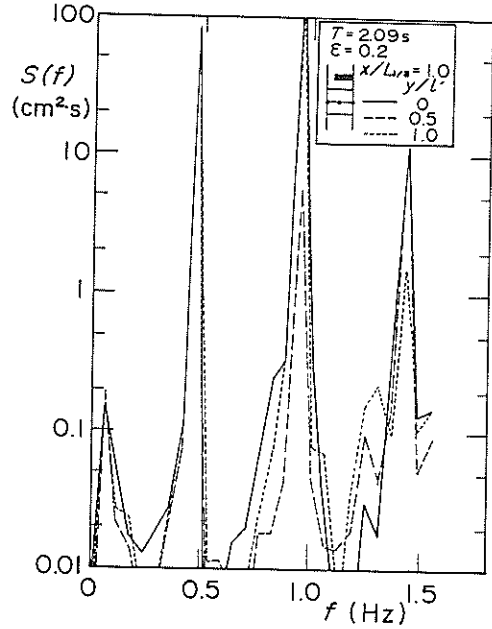


図-30(1) 伝達波のスペクトル
(規則波, $T_I = 1.81$ s)

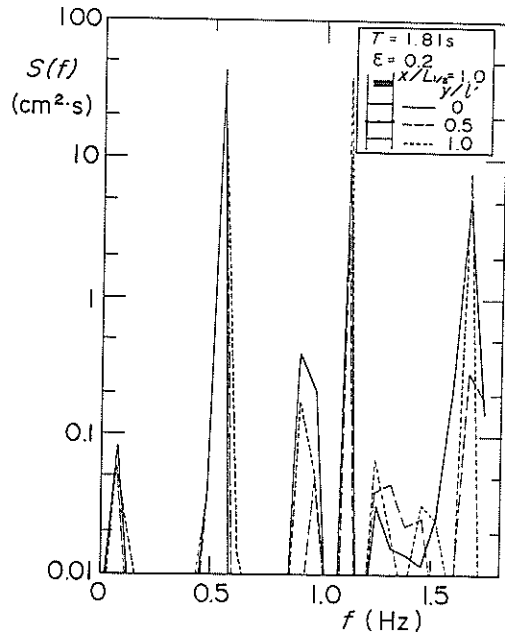
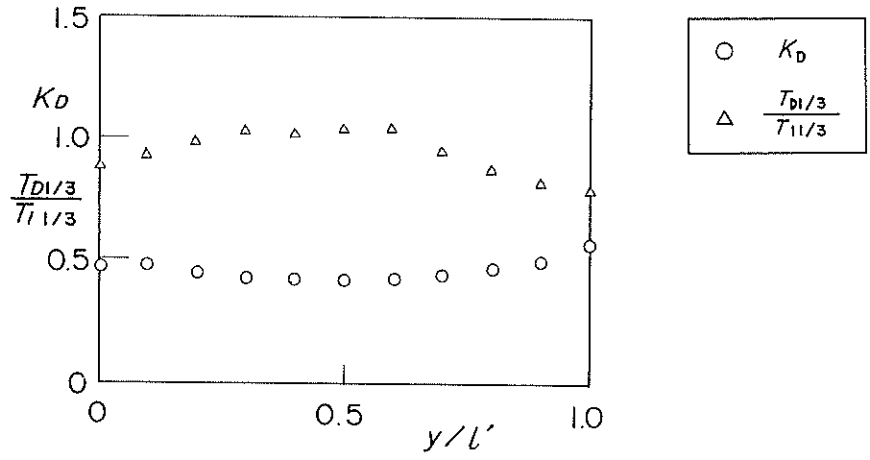
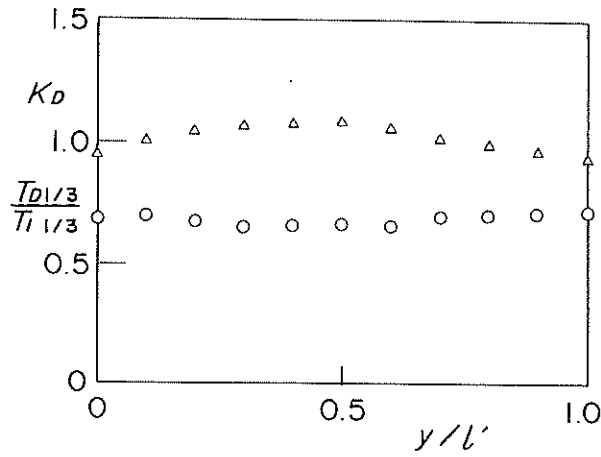


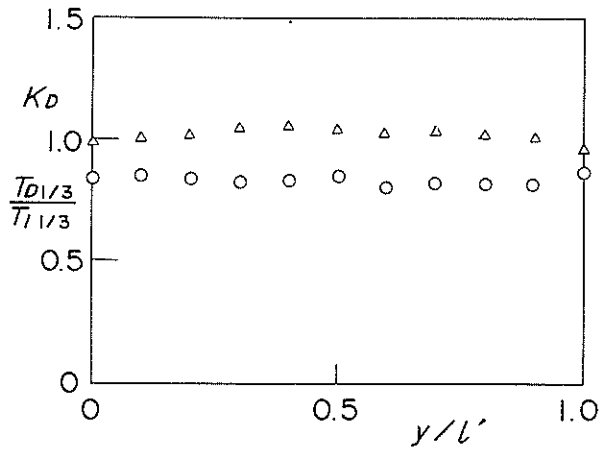
図-30(2) 伝達波のスペクトル
(規則波, $T_I = 2.09$ s)



(1) ($\epsilon = 0.2$)

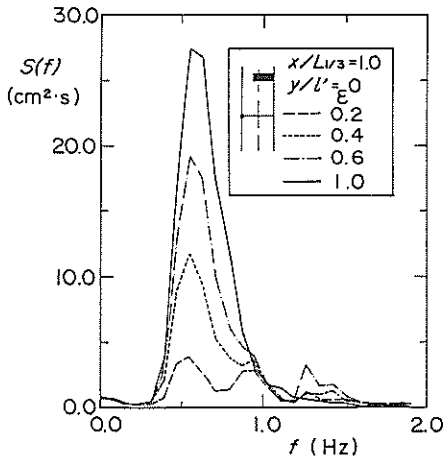


(2) ($\epsilon = 0.4$)

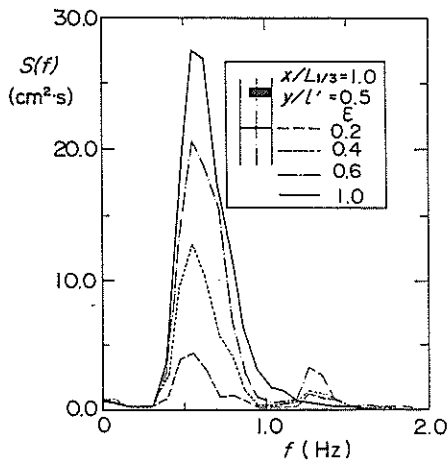


(3) ($\epsilon = 0.6$)

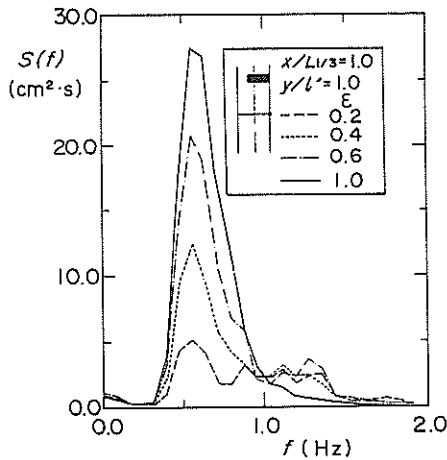
図-31 不規則波の実験結果



(1) (不規則波, $y/l = 0$)



(2) (不規則波, $y/l = 0.5$)



(3) (不規則波, $y/l = 1.0$)

図-32 伝達波のスペクトル

ことを考慮すると、堤内における波高分布の推定には数値波動解析法が、波の非線形性を考慮していないものの妥当な結果を与えると言える。

次に不規則波による実験結果について検討する。図-31 (1), (2), (3)は不規則波を作用させたときの $x/L_{1/3} = 1.0$ における各測点の波高比 K_D と有義波周期の入射波のそれに対する比 $T_{D1/3}/T_{1/3}$ を示したものである。図中には数値計算による波高比を示していないが、実験値と計算値の比較は港内における平均伝達率 \bar{K}_D について行うこととし、これについては後述する。

図-31 (1), (2), (3)によると、 K_D の変化は規則波の場合に比べて緩やかであり、開口比が小さいときには規則波の長周期波の場合と同様に水路両側壁付近で K_D が増加する傾向が見られる。また、 $T_{D1/3}/T_{1/3}$ は開口比が小さいほど、水路両側壁付近で 1.0 以下となる傾向がある。これらはやはり入射波の有義波周期より小さい周期の水路横断方向の横波の影響と考えられるため、開口率 $\varepsilon = 0.2, 0.4, 0.6$ の場合について $x/L_{1/3} = 1.0$ の $y/l' = 0, 0.5, 1.0$ の位置での伝達波のスペクトル形を調べた。図-32 (1), (2), (3)はこれらを示したものであり、横軸は周波数、縦軸はスペクトル密度、パラメータは開口率である。 $y/l' = 0, 1.0$ の水路両側壁付近では、 $f = 0.87 \text{ Hz}, 1.25 \text{ Hz}$ に対するスペクトル値が大きくなっている。 $y/l' = 0.5$ ではスペクトル値は $f = 1.25 \text{ Hz}$ で大きくなっているが、 $f = 0.87 \text{ Hz}$ では小さい。これらの周波数は横波の基本周波数および二次周波数と一致するものであり、スペクトル値の場所的な変化の傾向は、図-29 に示した横波の発生状態を裏付けるものである。すなわち、横波は水路両側壁部では基本周波数および二次周波数の成分波とも腹を形成するが、水路中央部では二次周波数の成分波のみが腹を形成するため、その結果として図-32 (1), (2), (3)に見られるようなスペクトルの変化を生じていると考えられる。

また、横波は開口部から回折波によって励起され、時間の経過とともに発達すると考えられるため、不規則波実験のように長時間波を作用させる場合には、横波の持つエネルギーは大きなものとなる。防波堤の開口率が小さいときには伝達波の全体の持つエネルギーは小さいため相対的に横波の影響が大きくなると考えられる。

図-33 は不規則波に対する堤内の合成伝達率 \bar{K}_D について実験値と計算値を比較したものである。図中には、不規則波実験の有義波高から求めた検査域内の平均伝達率と規則波実験で用いた 2 種類の解析法に基づく波高比から式(7)を用いて求めた不規則波に対する検査域内の平均伝達率を示している。また図中の実線は数値計算によ

る検査域内合成伝達率を示している。不規則波実験による \bar{K}_D 値は開口率 $\varepsilon = 0.2$ で計算値より0.1程度大きくなっているが、 $\varepsilon = 0.6$ では計算値とほぼ一致している。これは開口率が小さいほど、ピーク周波数近傍のスペクトル密度に対する横波の持つスペクトル密度の相対的な影響が大となるためである。規則波に対する波高比の合成により求めた \bar{K}_D 値のうち、入射波の周波数成分から求めたものは計算値と非常によく一致しているが、1周期間の正負の最大ピークから求めたものについては計算値より0.15~0.20大きくなっている。この要因については既に述べたところである。

以上述べた水理実験の結果から、数値波動解析法による計算値は入射波のエネルギー分裂による高次波の影響を考慮していない点で若干小さめの伝達率を与えるが、その影響は小さく、堤内の伝達率の推定に対してはほぼ妥当なものであると言える。

なお、堤内側の波高分布については、入射波が規則波

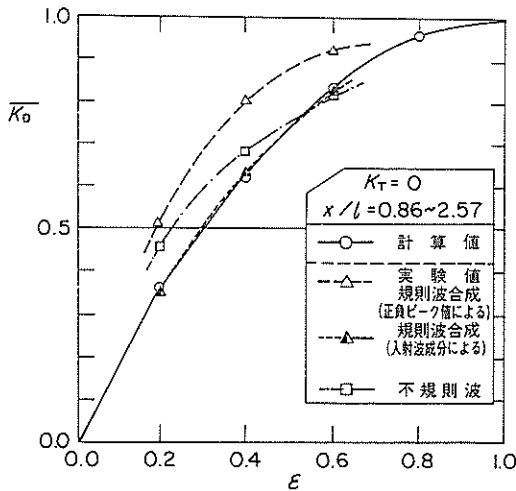


図-33 実験値と計算値の比較

および不規則波の場合とも付図に示しているので参照していただきたい。

5. 各構造に対する具体的計算例

数値波動解析法による計算結果を用いて、本資料で対象とした3種の波浪制御構造物の現地海洋における具体的な配置法を検討した。検討の条件は、水深50mにおける有義波周期14s、有義波高9m ($L_{1/3} = 256.9$ m、 $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.035$)の入射波を背後域で有義波高5mに減衰させる場合を考え、 $\bar{K}_D = 0.56$ とした。構造物の配置方法は配置幅150m程度の一列配置とした。以下にその方法および結果を示す。

まず $\bar{K}_D = 0.56$ に対する透過性防波堤の開口率をそれ自体の伝達率 K_T との関係(図-12)から求め、次に配置幅約150mにおける堤体長と開口部幅を適切に決める。

本資料で対象とした3種の波浪制御構造物の構造諸元は表-9に示すとおりであり、各構造の伝達率 K_T は文献1)で報告した結果より、それぞれ以下の値となる。

水平板付立体骨組構造 $K_T = 0.40$

上部半円形断面構造 $K_T = 0.30$

透過壁式二重セル構造 $K_T = 0.35$

これらの K_T に対する所要開口率は、図-12の $\bar{K}_D = 0.56$ の曲線を用いると次のようになる。

水平板付立体骨組構造 $\varepsilon = 0.24$

上部半円形断面構造 $\varepsilon = 0.29$

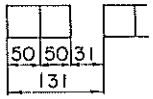
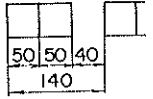
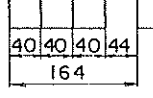
透過壁式二重セル構造 $\varepsilon = 0.27$

表-10は上記の結果をまとめたものであり、波浪制御構造物の総延長を5,000mとしたときの所要堤体函数も例示している。表中の1セット長は配置幅を意味しており、基準とした150mとは若干異なっているが、これは透過性防波堤自体の延長方向幅がそれぞれの構造ごとに決まっているためであり、多少の配置幅の差異は特に問題はないと思われる。

表-9 各構造の諸元

構造	h (m)	B (m)	h' (m)	h_c (m)	d' (m)	ε_V	D (m) (延長方向幅)
水平板付立体骨組構造	50	50	30	5	3.75	0.58 (投影開口比)	50
上部半円形断面構造	50	40	27.5	7.5	12.5	0.25	50
透過壁式二重セル構造	50	40	30	10	10	0.25	40

表-10 各構造の具体的計算例

構造形式	堤体および配置諸元				配置略図 (延長5,000mの所要函数)
	堤体長 (D) m		函数 (n)		
水平板付立体骨組構造	堤体長 (D) m	50	函数 (n)	2	 (77函)
	伝達率 (K_T)	0.40	開口部幅 (l_o) m	31	
	開口率 (ϵ)	0.24	1セット長 ($nD+l_o$) m	131	
上部半円形断面構造	堤体長 (D) m	50	函数 (n)	2	 (72函)
	伝達率 (K_T)	0.30	開口部幅 (l_o) m	40	
	開口率 (ϵ)	0.29	1セット長 ($nD+l_o$) m	140	
透過壁式二重セル構造	堤体長 (D) m	40	函数 (n)	3	 (92函)
	伝達率 (K_T)	0.35	開口部幅 (l_o) m	44	
	開口率 (ϵ)	0.27	1セット長 ($nD+l_o$) m	164	

6. あとがき

本研究の結果得られた主要な結論をまとめると以下のとおりである。

(1) 数値波動解析法による計算結果は、水理実験結果とよく一致しており、港内伝達率の推定に有効に利用できる。

(2) 防波堤の開口率が同一の条件においては、開口部を含む防波堤の配置幅により堤内の伝達率は変化するが本資料で対象とした外洋の長周期波に対して配置幅は、150 m程度を基準として良い。

(3) 配置形式については、本資料の検討範囲(防波堤の開口率 $\epsilon = 0.2, 0.6$, 入射波周期 $T = 12.2$ s)では、千鳥配置のとき一列配置より堤内の伝達率は小さくなる場合がある。これは千鳥配置のほうが防波効果が高いことを意味するものであるが、反射波高が大きくなったり、伝達波が局所的に乱れるなどの理由により一般的な結論を導くにはさらに検討の余地を残す。

(4) 本資料で対象とした3種の波浪制御構造物について、水深50mの地点で有義波諸元 $T_{1/3} = 14.0$ s, $H_{1/3} = 9.0$ m, ($L_{1/3} = 256.9$ m, $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.035$)の波浪を背後域で $H_{1/3} = 5.0$ m に制御する条件に対して、各構造の法線に開口部を設けて一列に配置したときの所要

開口率 ϵ は次のようになる。

- a) 水平板付立体骨組構造 $\epsilon = 0.24$
- b) 上部半円形断面構造 $\epsilon = 0.29$
- c) 透過壁式二重セル構造 $\epsilon = 0.27$

本研究は大水深波浪制御構造物の開発のための基礎資料を得ることを目的として、既に提案した3種の波浪制御構造物の防波性能をその配置方法に着目して検討したものである。これにより防波堤の配置法に関する資料が得られたが、透過性防波堤自体の伝達率を不規則波の各成分波に対して一定の伝達率で与えたこと、また、実験で生じた横波の影響が、延長方向に充分広い平面的な実験でも生じるのか等の問題が残されている。さらに実用化については堤体の波力特性等を解明することが必要である。これについては次報以降に報告する。

本研究の遂行およびデータ整理等については防波堤研究室、波エネルギー研究室諸氏の協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

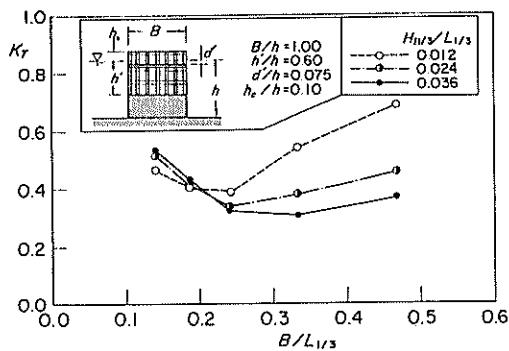
参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その1）— 透過性構造（海底設置型）の反射および伝達特性に関する不規則波実験 —，港湾技研資料，No. 516，1985，37 p.
- 2) 伊藤喜行・谷本勝利：新しい方法による波動の数値計算 — 防波堤周辺の波高分布への適用 —，港湾技術研究所報告，Vol. 10，No. 2，1971，6，pp. 97～120.
- 3) 伊藤喜行・谷本勝利・山本庄一：波向線交差領域における波高分布 — 数値波動解析法の応用 —，港湾技術研究所報告，Vol. 11，No. 3，1972，9，pp. 87～109.
- 4) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港湾技術研究所報告，Vol. 14，No. 3，1975，9，pp. 35～58.
- 5) 数値波動解析 プログラムライブラリー(10)，港湾技術研究所計算室資料，No. L010，1976，2，170 p.
- 6) 例えば，合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1977.10，pp. 32～34.
- 7) 富田英治：不規則波実験制御解析システムについて，港湾技研資料，No. 452，1983，34 p.
- 8) 谷本勝利・富田英治・村永努：水路における不規則波の再反射の影響について，港湾技研資料，No. 467，1983，23 p.
- 9) 前出1)と同じ
- 10) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治：不規則波における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976，28 p.

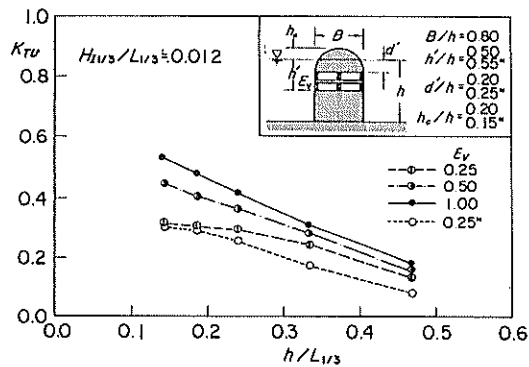
f_i	:	成分波周波数
Δf	:	成分波の受け持つ周波数範囲
h	:	堤体設置水深
h_c	:	堤体天端高
h'	:	基部ケーソン上水深
H_I	:	通過波高
H_{I1}	:	通過波有義波高
$H_{IVS'}$:	分離入射波有義波高
H_{V3}	:	設計有義波高
K_D	:	堤内の波高比（不規則波）
K_D'	:	堤内の波高比（規則波）
$\overline{K_D}$:	堤内の合成伝達率（不規則波）
$\overline{K_D'}$:	堤内の平均伝達率（規則波）
K_R	:	反射率
K_T	:	透過性防波堤自体の伝達率
L	:	波長
L_{V3}	:	設計有義波波長
l	:	配置幅
l'	:	水路幅
l_G	:	開口部幅
n	:	ケーソンかん数
$S(f)$:	スペクトル密度
Δs	:	数値波動解析 計算メッシュ間隔
T_I	:	周期
$T_{D1/3}$:	堤内の伝達波有義波周期
T_{IV3}	:	通過波有義波周期
T_{V3}	:	設計有義波周期
w_i	:	成分波の合成に用いる重み（エネルギー分担率）
w_0	:	水の単位体積重量
x	:	堤背面から港内方向への距離
y	:	開口部側水路壁からの水路横断方向への距離
ε	:	防波堤延長方向の開口率

主要記号一覧表

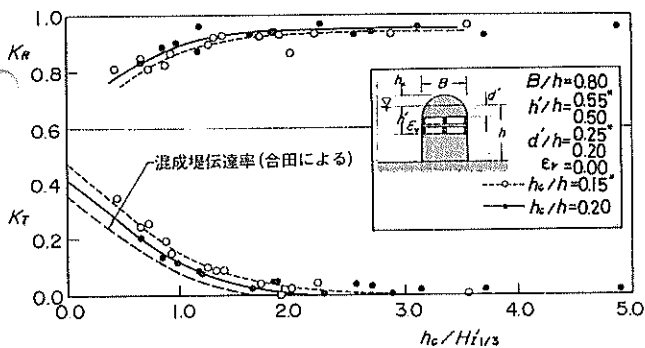
A_{sa}	:	スペクトル全面積
A_{sfi}	:	成分波の受け持つスペクトル面積
B	:	堤体幅
c_{max}	:	最大波速
D	:	延長方向の堤体幅（1かんあたり）
d	:	千鳥配置時の前後堤間隔
d'	:	水平板部材設置水深（水平板付立体骨組構造） 上部半円形部下端深（上部半円形構造） 透過部下端深さ（透過壁式二重セル構造）
E	:	波の持つエネルギー



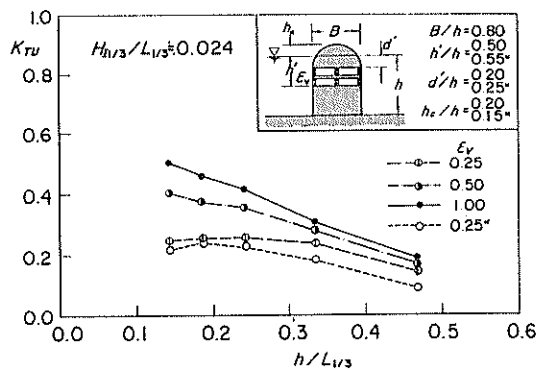
付図-1 水平板立立体骨組構造の伝達率



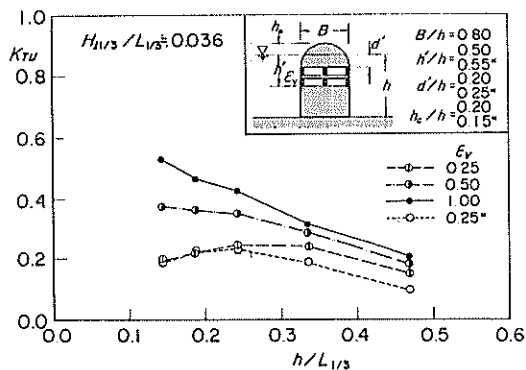
付図-2(2) 上部半円形断面構造の透過伝達率
($H_{1/3}/L_{1/3} = 0.012$)



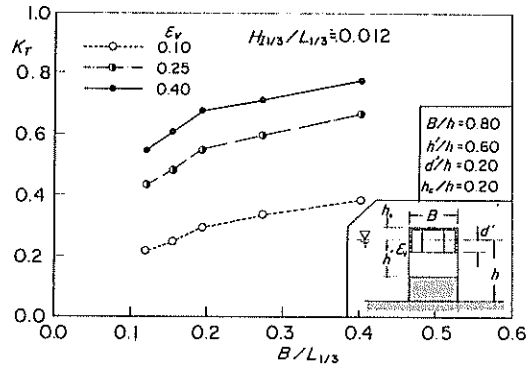
付図-2(1) 上部半円形断面構造の
反射率および越波伝達率



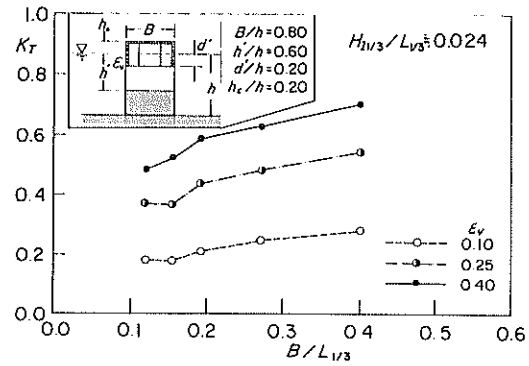
付図-2(3) 上部半円形断面構造の透過伝達率
($H_{1/3}/L_{1/3} = 0.024$)



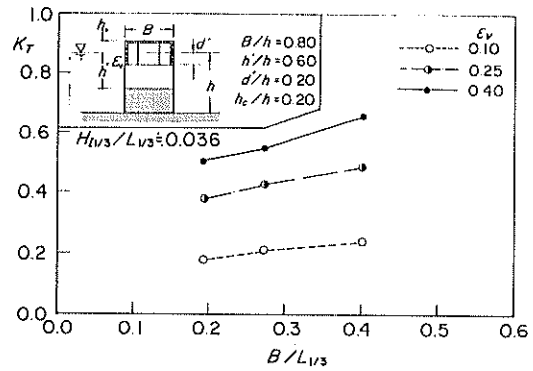
付図-2(4) 上部半円形断面構造の透過伝達率
($H_{1/3}/L_{1/3} = 0.036$)



付図-3 (1) 透過壁式二重セル構造の伝達率
($H_{1V3}/L_{V3} = 0.012$)

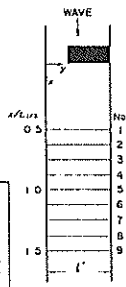


付図-3 (2) 透過壁式二重セル構造の伝達率
($H_{1V3}/L_{V3} = 0.024$)



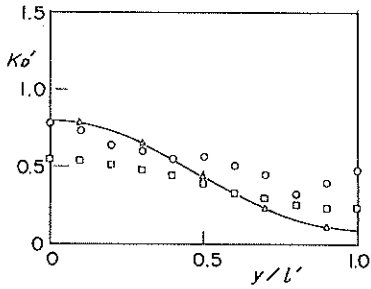
付図-3 (3) 透過壁式二重セル構造の伝達率
($H_{1V3}/L_{V3} = 0.036$)

$\epsilon = 0.2$
 $T_I = 1.21 \text{ s}$

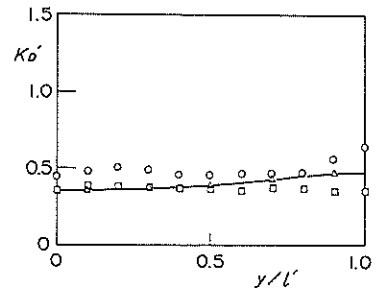


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

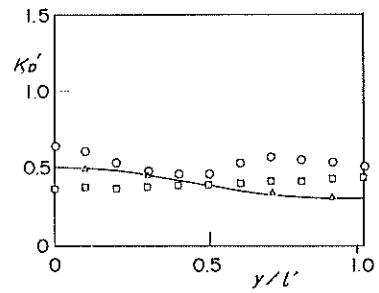
No. 1



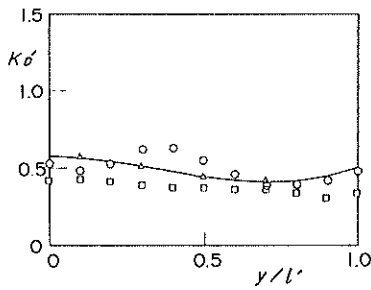
No. 5



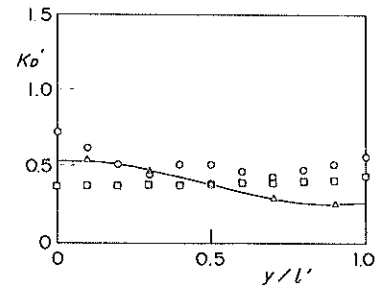
No. 6



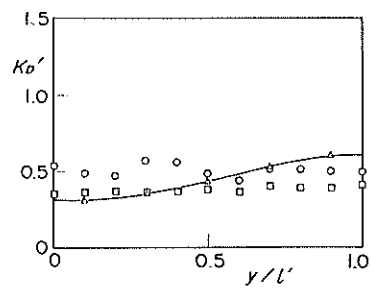
No. 2



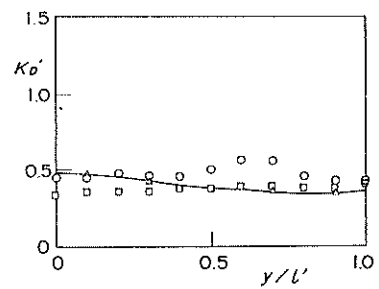
No. 7



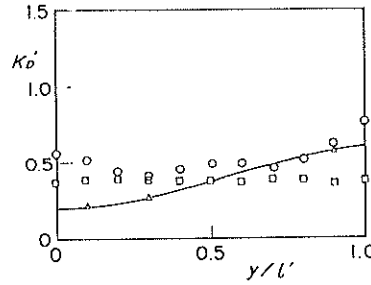
No. 3



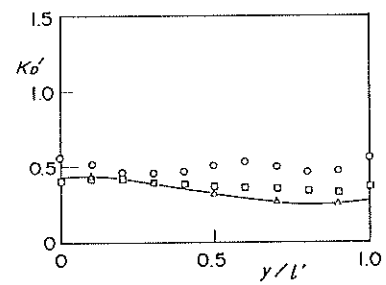
No. 8



No. 4

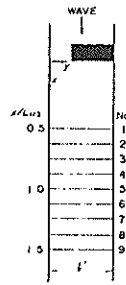


No. 9



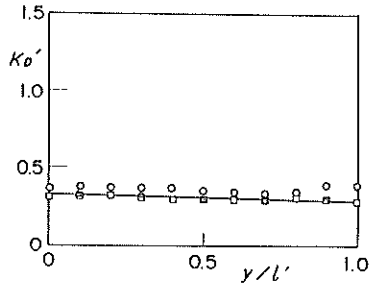
付図-4(1) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.2$, $T_I = 1.21 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.2$
 $T_I = 1.41 \text{ s}$

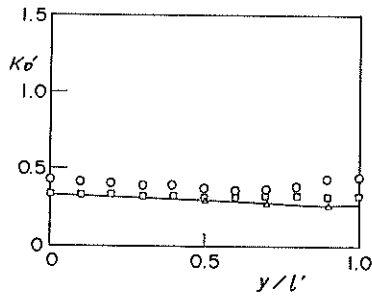


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

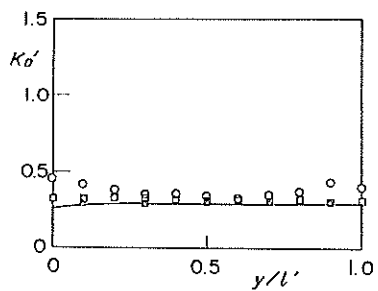
No. 1



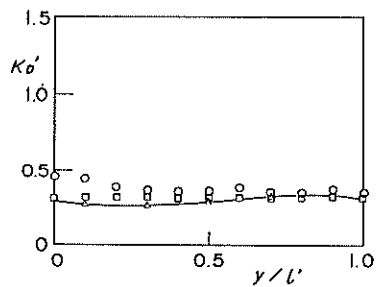
No. 2



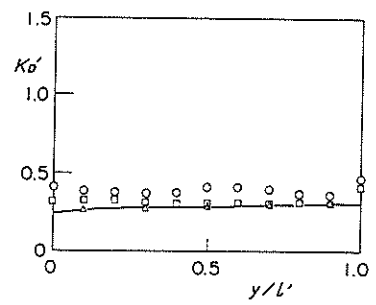
No. 3



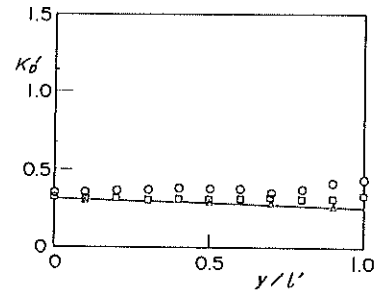
No. 4



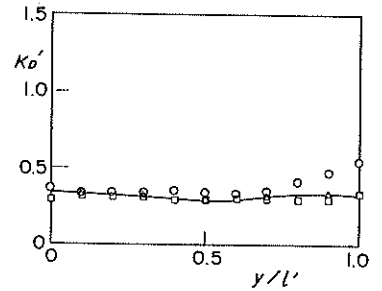
No. 5



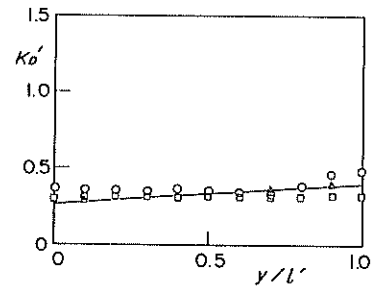
No. 6



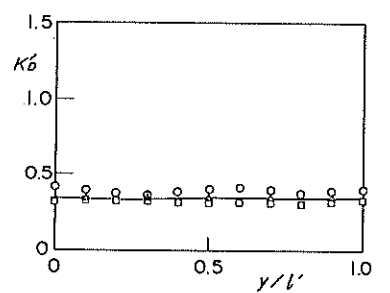
No. 7



No. 8



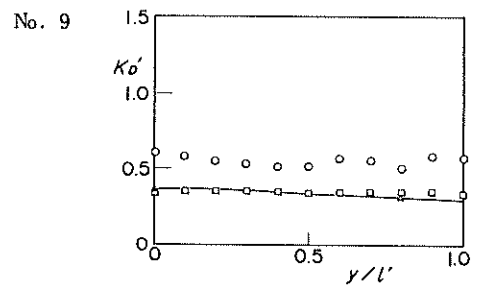
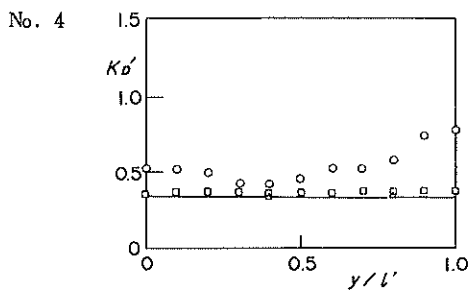
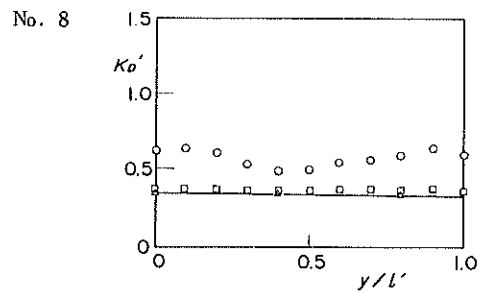
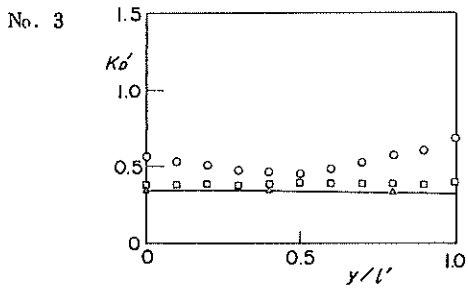
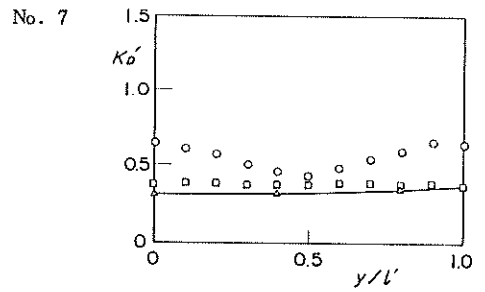
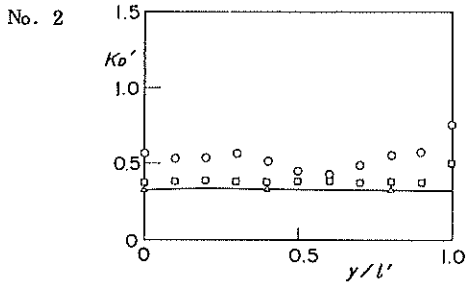
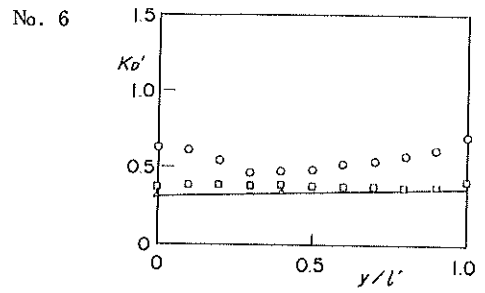
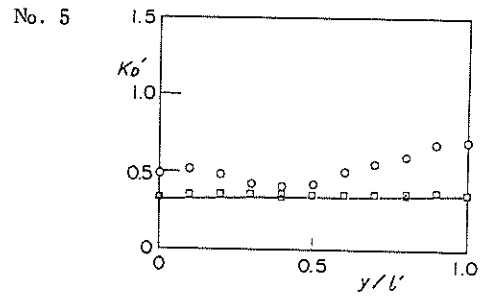
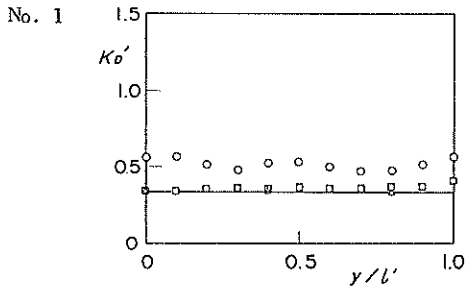
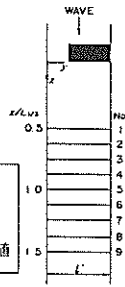
No. 9



付図-4(2) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.2, T_I = 1.41 \text{ s}$)

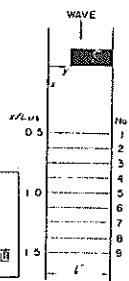
$\varepsilon = 0.2$
 $T_f = 1.81 \text{ s}$

△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値



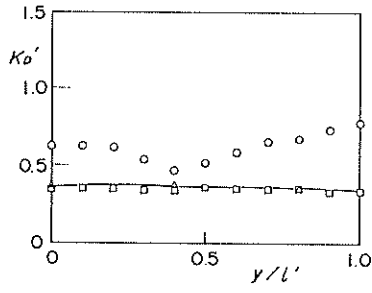
付図-4(3) 規則波の実験結果 ($s = 0.2$, $T_f = 1.81 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.2$
 $T_I = 2.09$ s

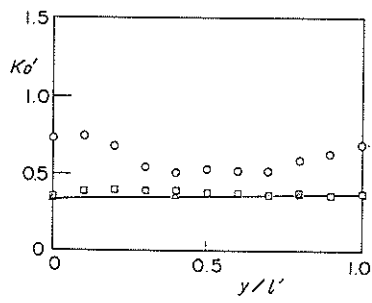


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

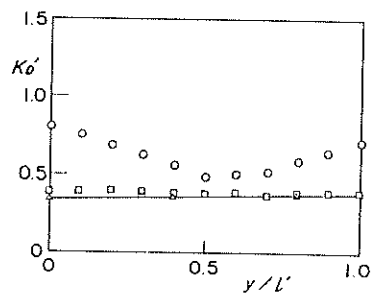
No. 1



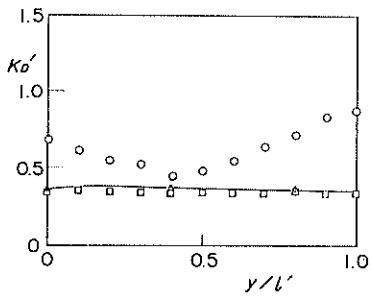
No. 5



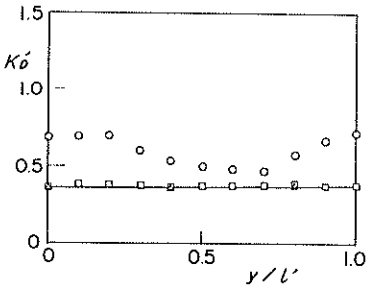
No. 6



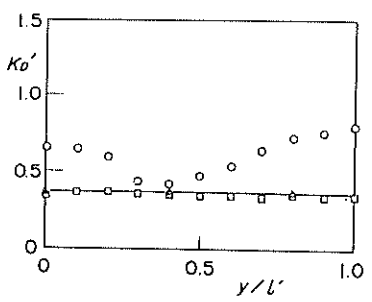
No. 2



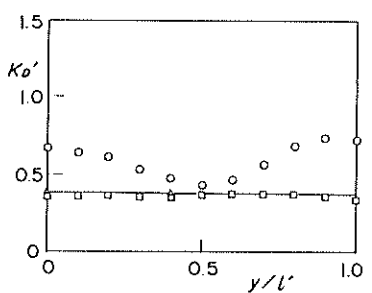
No. 7



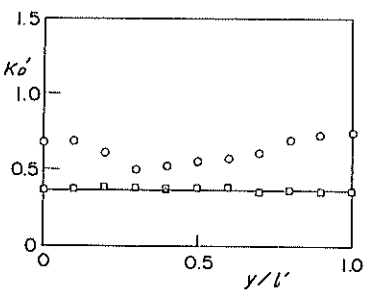
No. 3



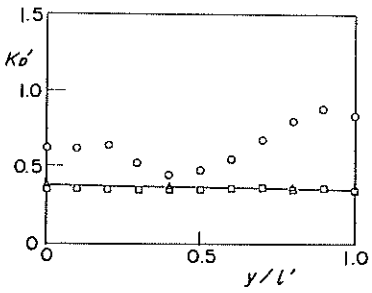
No. 8



No. 4

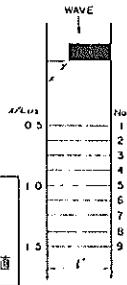


No. 9



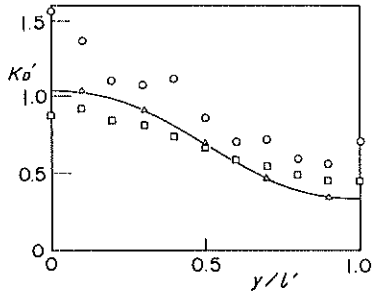
付図-4(4) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.2$, $T_I = 2.09$ s)

$\epsilon = 0.4$
 $T_I = 1.21 \text{ s}$

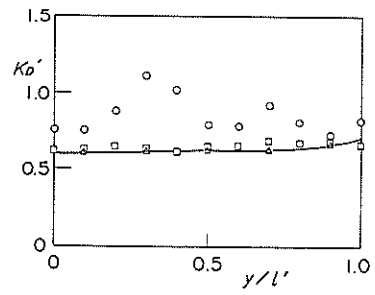


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

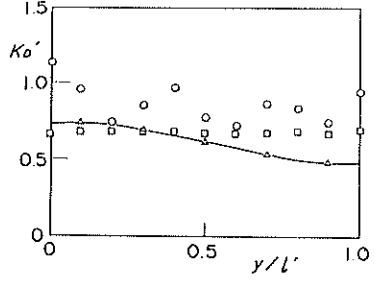
No. 1



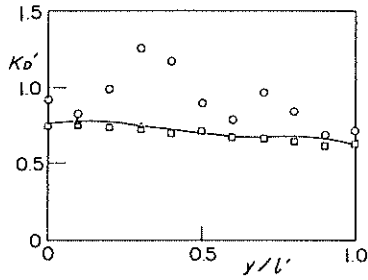
No. 5



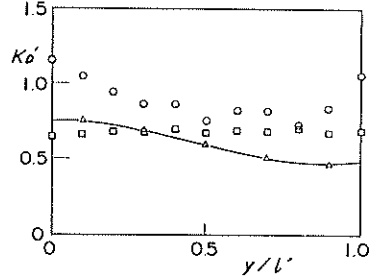
No. 6



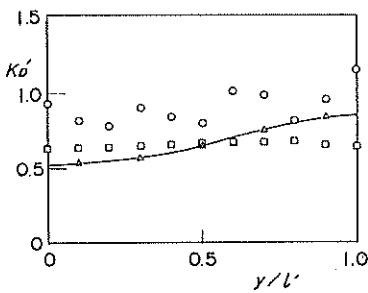
No. 2



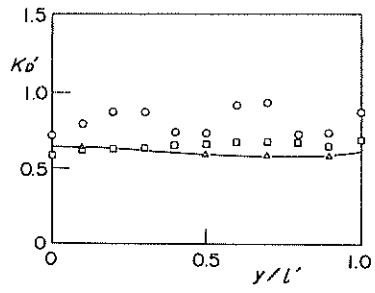
No. 7



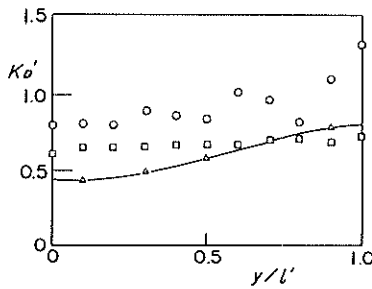
No. 3



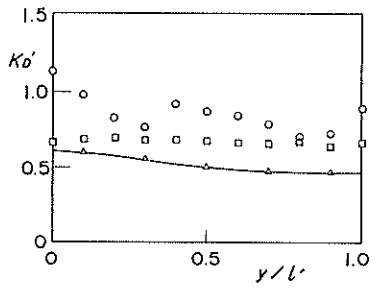
No. 8



No. 4

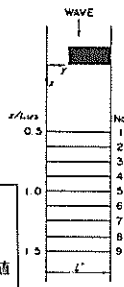


No. 9



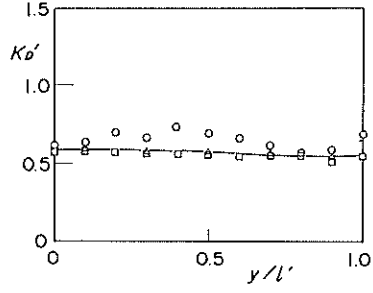
付図-5(1) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.4$, $T_I = 1.21 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.4$
 $T_I = 1.41 \text{ s}$

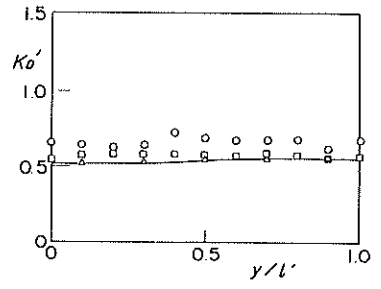


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

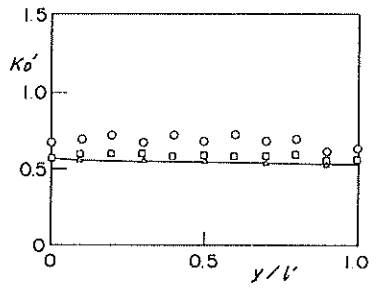
No. 1



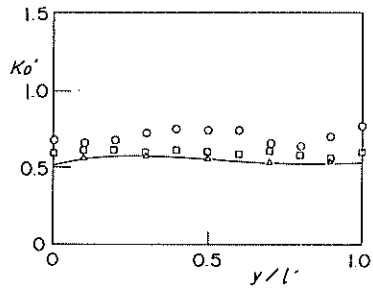
No. 5



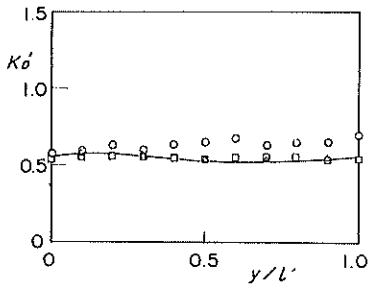
No. 6



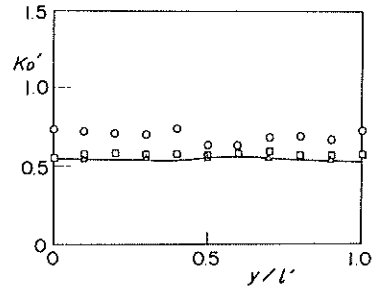
No. 2



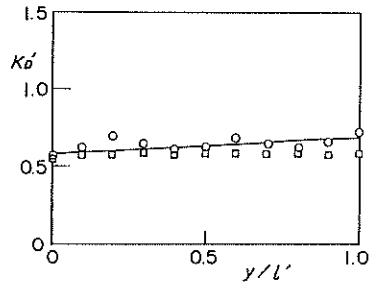
No. 7



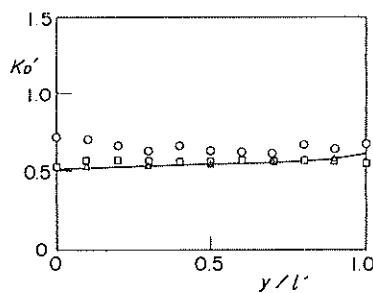
No. 3



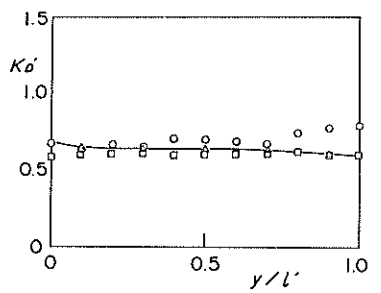
No. 8



No. 4



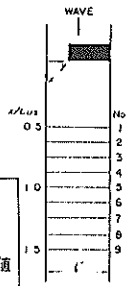
No. 9



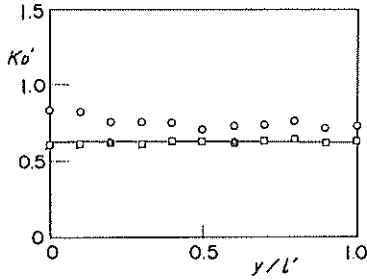
付図-5(2) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.4, T_I = 1.41 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.4$
 $T_I = 1.81 \text{ s}$

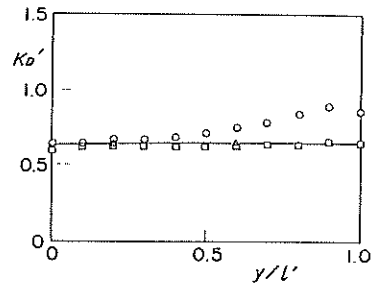
△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値



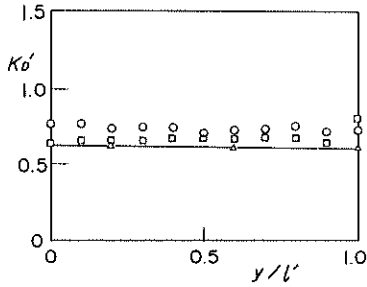
No. 1



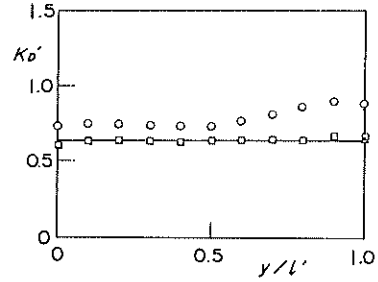
No. 5



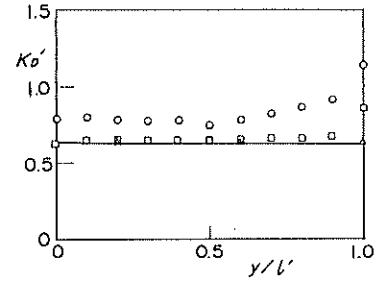
No. 2



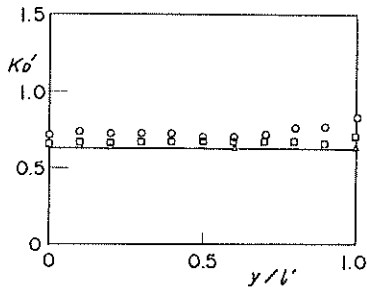
No. 6



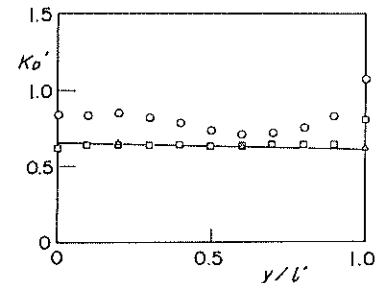
No. 7



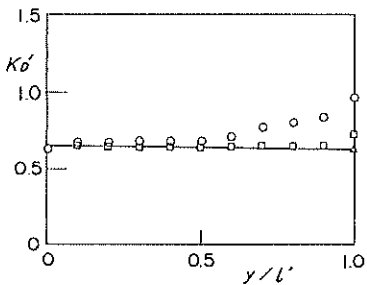
No. 3



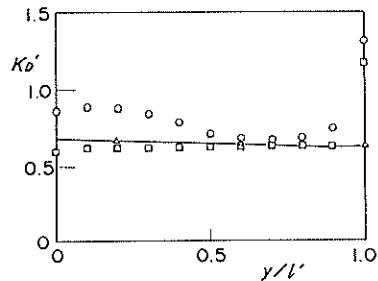
No. 8



No. 4



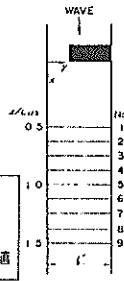
No. 9



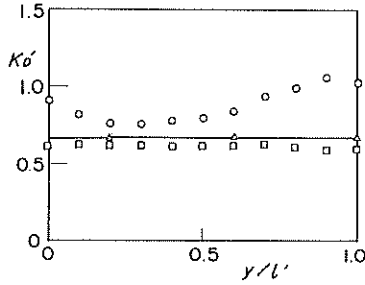
付図-5(3) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.4$, $T_I = 1.81 \text{ s}$)

$\varepsilon = 0.4$
 $T_I = 2.09 \text{ s}$

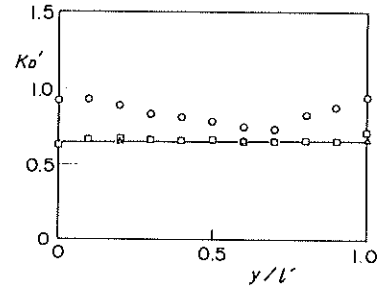
△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値



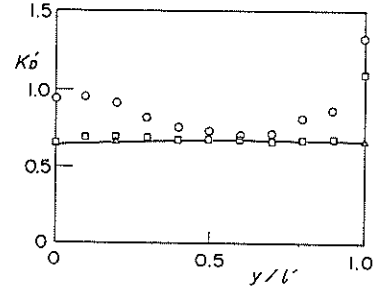
No. 1



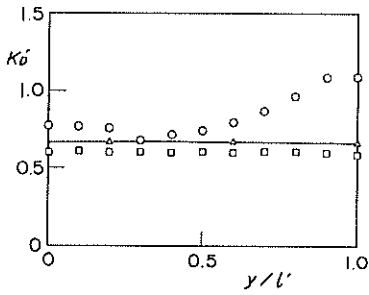
No. 5



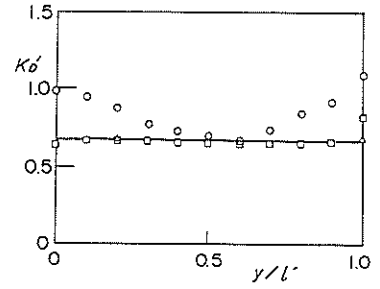
No. 6



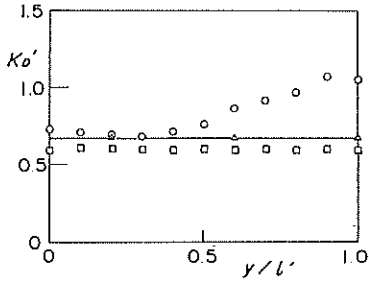
No. 2



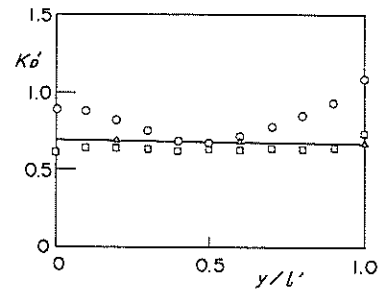
No. 7



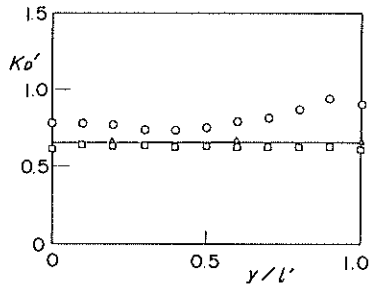
No. 3



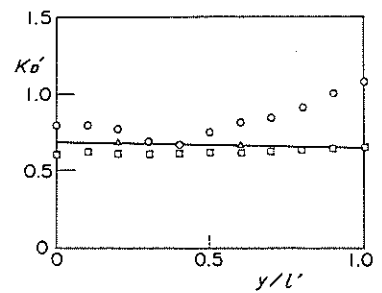
No. 8



No. 4

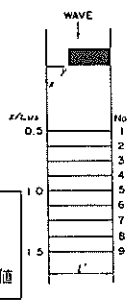


No. 9



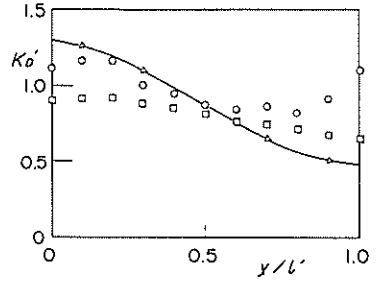
付図-5(4) 規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.4$, $T_I = 2.09 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.6$
 $T_I = 1.21 \text{ s}$

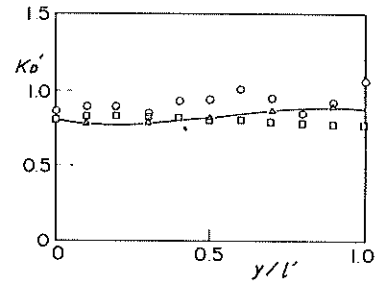


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

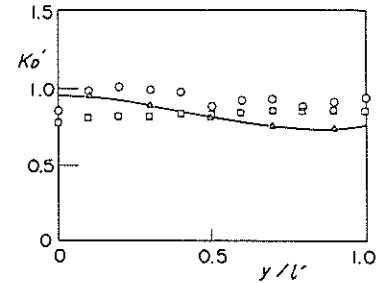
No. 1



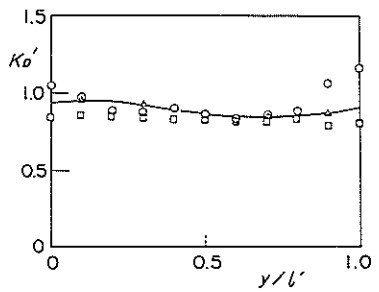
No. 5



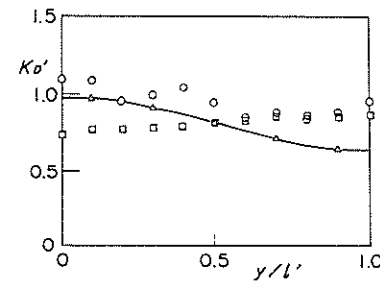
No. 6



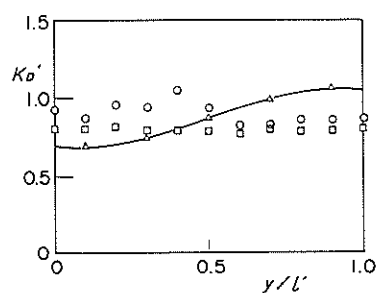
No. 2



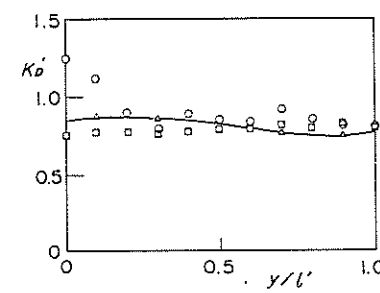
No. 7



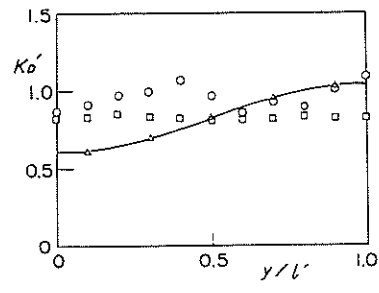
No. 3



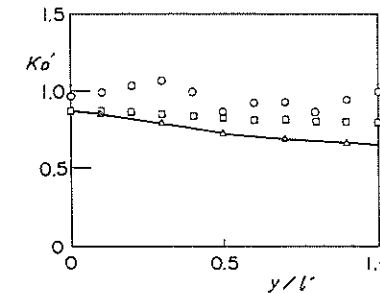
No. 8



No. 4

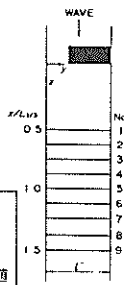


No. 9



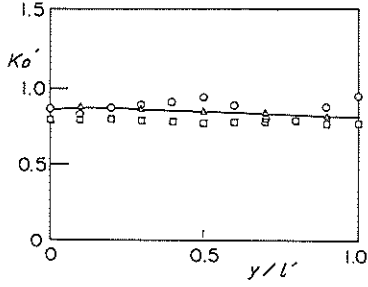
付図-6(1) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.6$, $T_I = 1.21 \text{ s}$)

$\varepsilon = 0.6$
 $T_I = 1.41 \text{ s}$

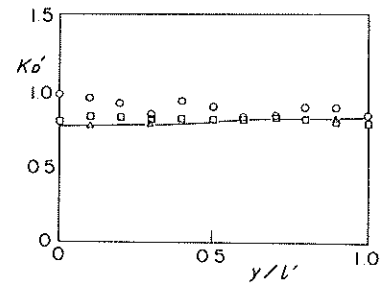


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

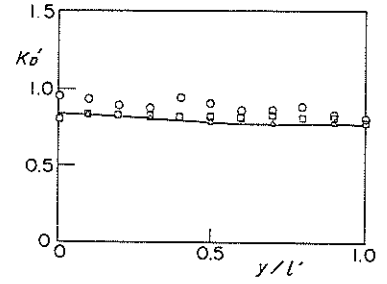
No. 1



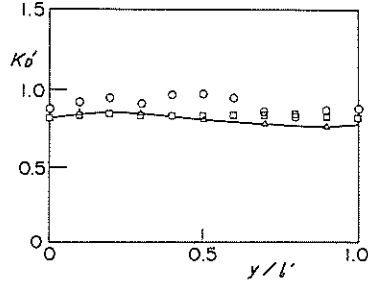
No. 5



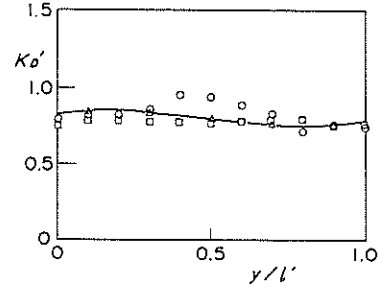
No. 6



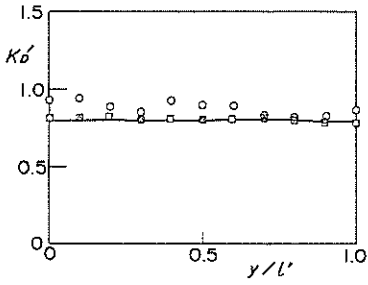
No. 2



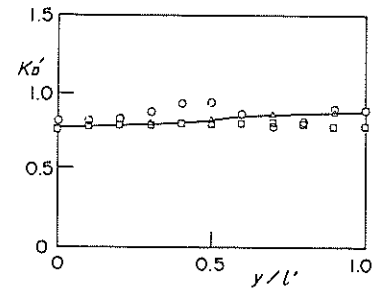
No. 7



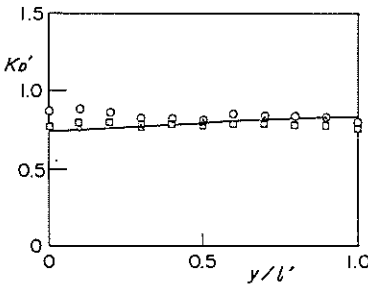
No. 3



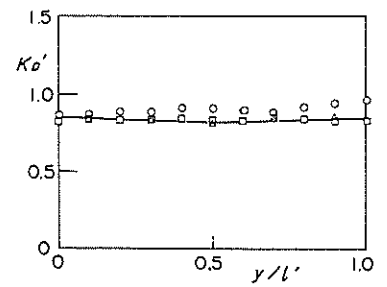
No. 8



No. 4



No. 9



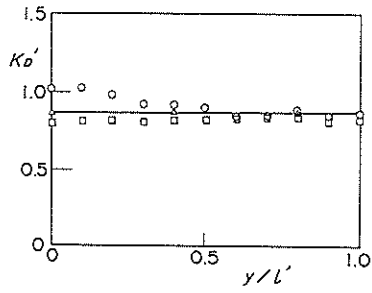
付図-6(2) 規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.6$, $T_I = 1.41 \text{ s}$)

$\varepsilon = 0.6$
 $T_f = 1.81 \text{ s}$

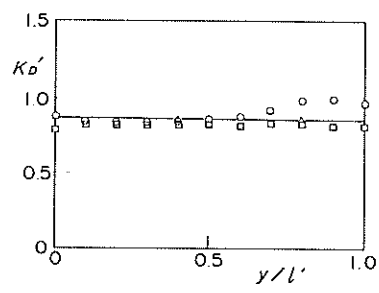


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

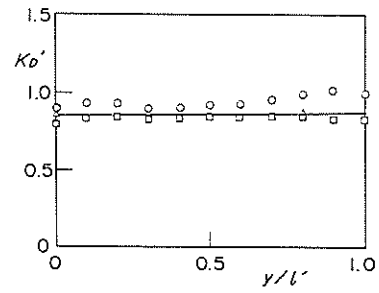
No. 1



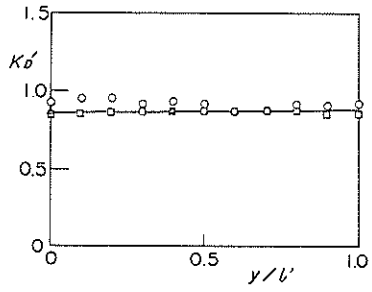
No. 5



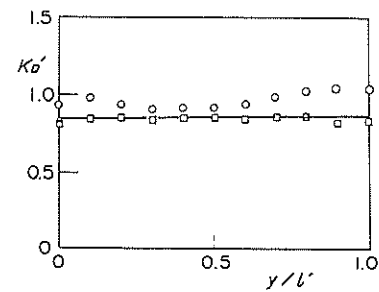
No. 6



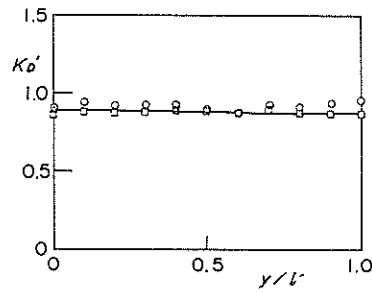
No. 2



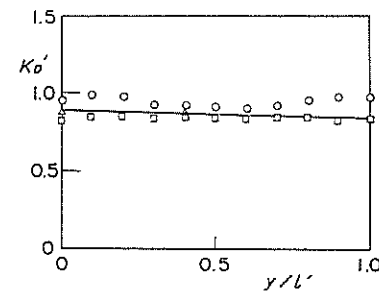
No. 7



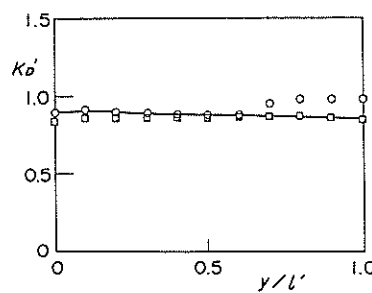
No. 3



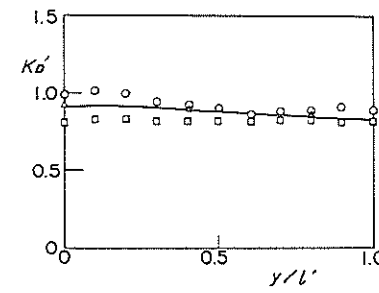
No. 8



No. 4

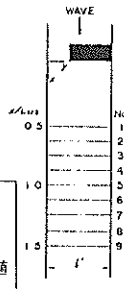


No. 9



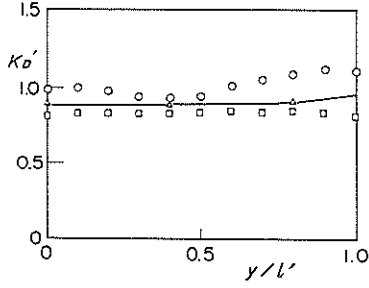
付図-6(3) 規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.6$, $T_f = 1.81 \text{ s}$)

$\epsilon = 0.6$
 $T_I = 2.09 \text{ s}$

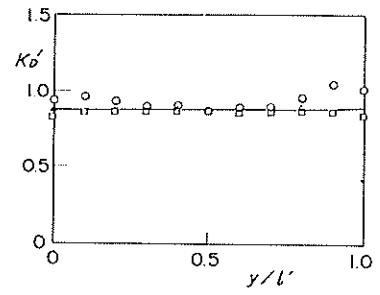


△ 計算値
 ○ 正負ピークによる実験値
 □ 入射波成分波による実験値

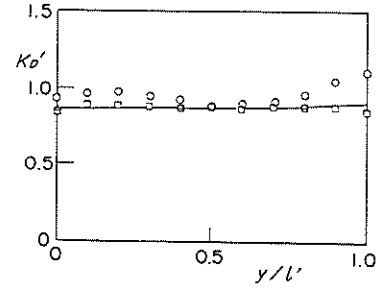
No. 1



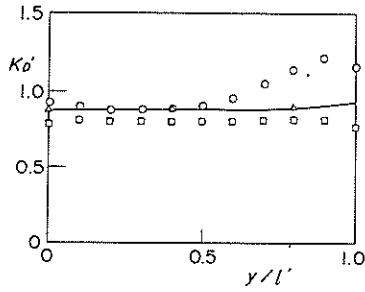
No. 5



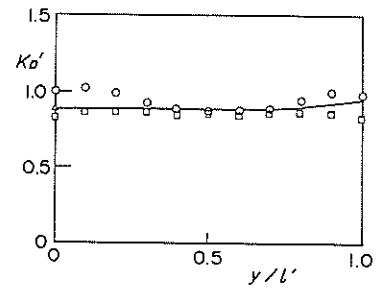
No. 6



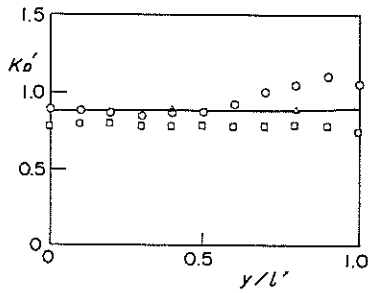
No. 2



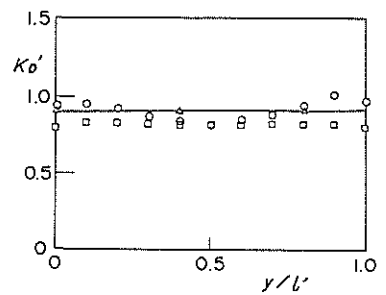
No. 7



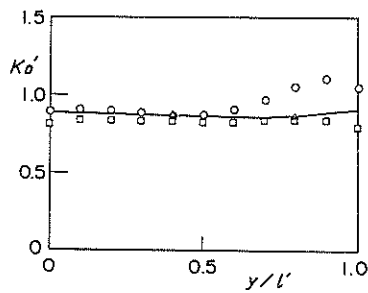
No. 3



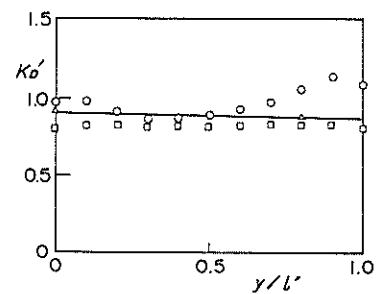
No. 8



No. 4



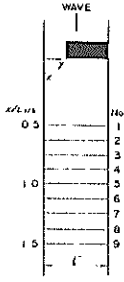
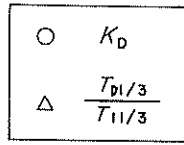
No. 9



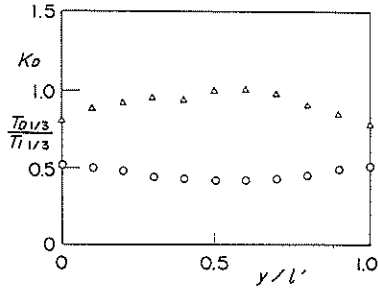
付図-6(4) 規則波の実験結果 ($\epsilon = 0.6$, $T_I = 2.09 \text{ s}$)

$$\varepsilon = 0.2$$

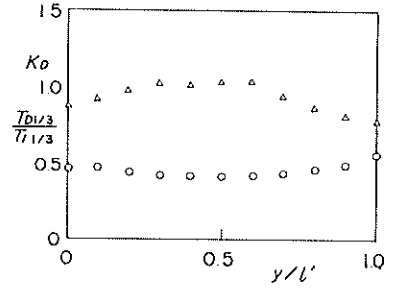
$$T_{11/3} = 1.642 \text{ s}$$



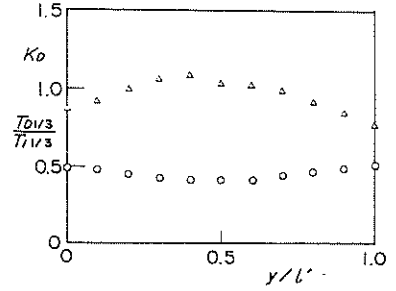
No. 1



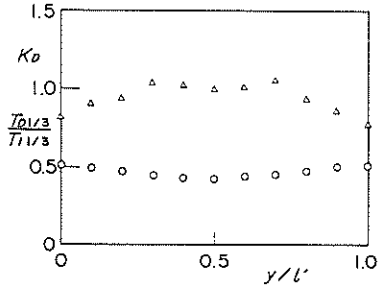
No. 5



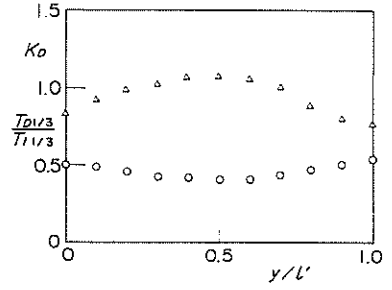
No. 6



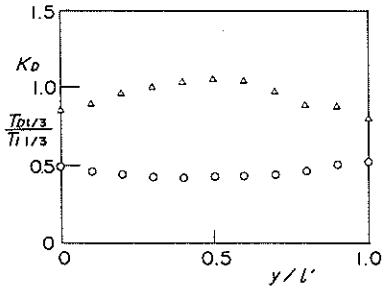
No. 2



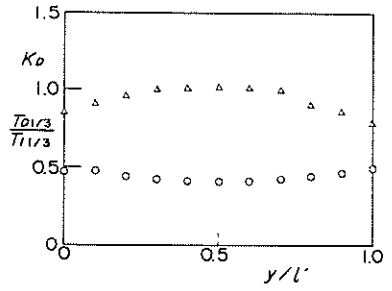
No. 7



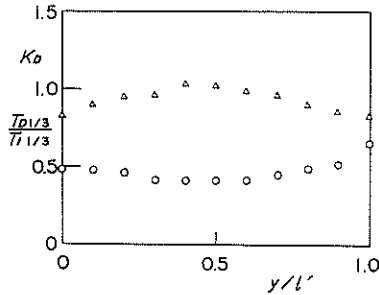
No. 3



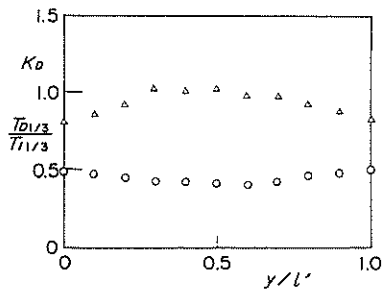
No. 8



No. 4



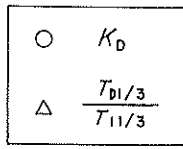
No. 9



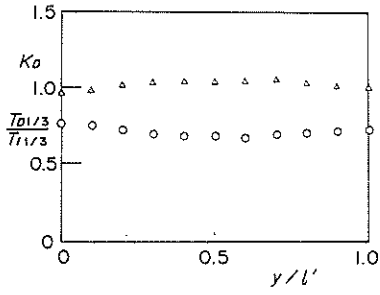
付図-7 (1) 不規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.2$)

$$\varepsilon = 0.4$$

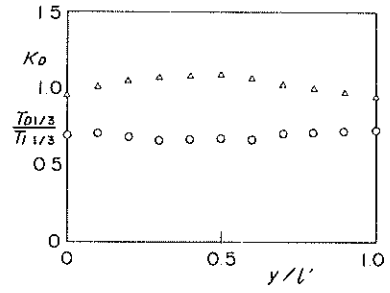
$$T_{I1/3} = 1.642 \text{ s}$$



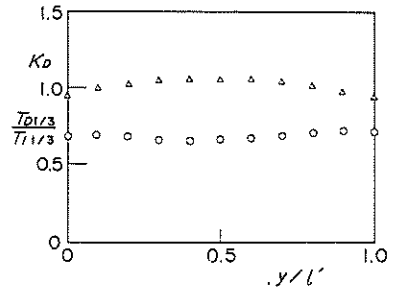
No. 1



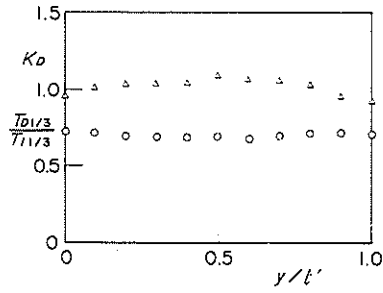
No. 5



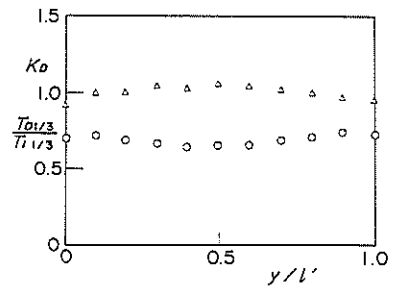
No. 6



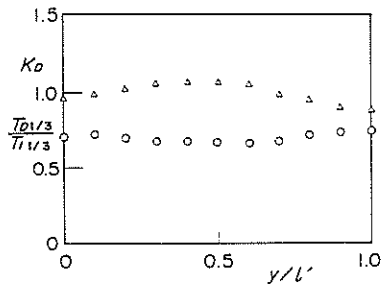
No. 2



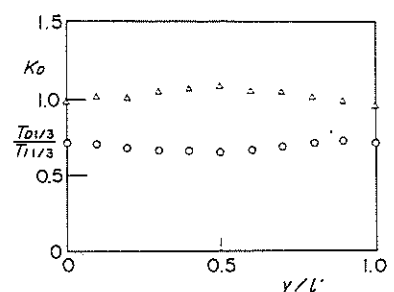
No. 7



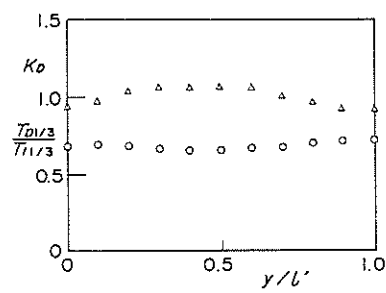
No. 3



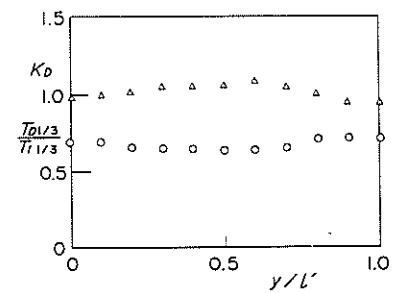
No. 8



No. 4



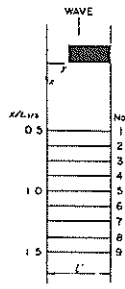
No. 9



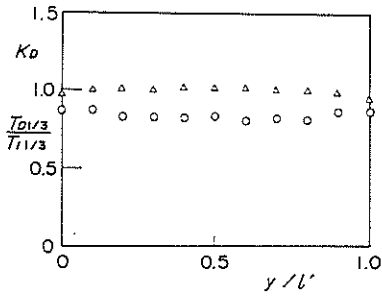
付図-7(2) 不規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.4$)

$\varepsilon = 0.6$
 $T_{1/3} = 1.642 \text{ s}$

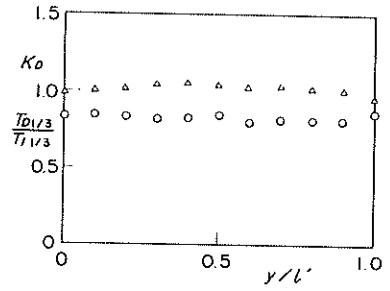
○ K_D
 △ $\frac{T_{D1/3}}{T_{11/3}}$



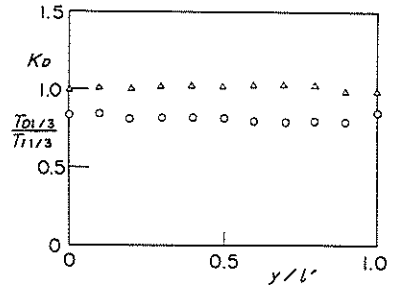
No. 1



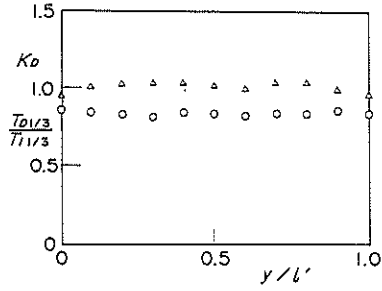
No. 5



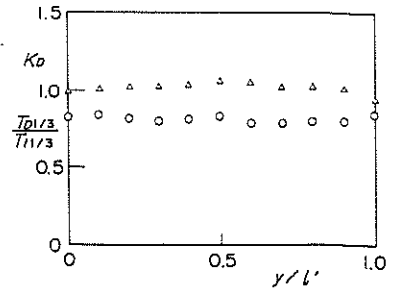
No. 6



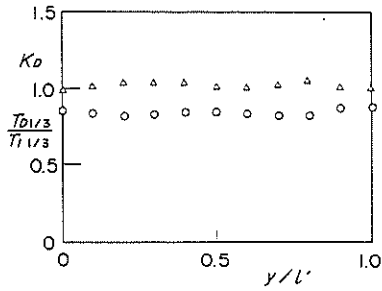
No. 2



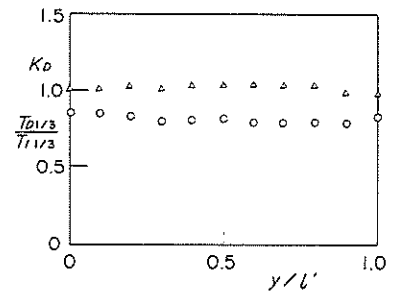
No. 7



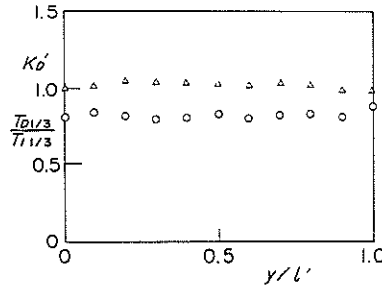
No. 3



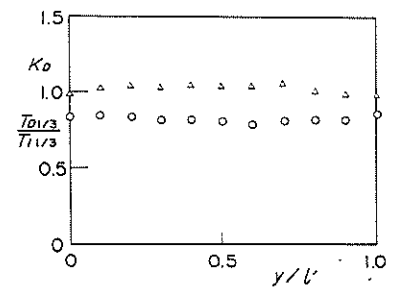
No. 8



No. 4



No. 9



付図-7(3) 不規則波の実験結果 ($\varepsilon = 0.6$)

港湾技研資料 No. 526

1985・6

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.