

土 木 研 究 所 資 料

海域制御構造物の開発に関する 共同研究報告書（2）

昭和62年 7 月

建設省土木研究所
河川部海岸研究室

Copyright © 1987 by P.W.R.I.

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

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

海域制御構造物の開発に関する 共同研究報告書（2）

建設省土木研究所海岸研究室	室長	宇 多 高 明
〃	研 究 員	村 井 楨 美
〃	部外研究員	藤 原 隆 一
飛島建設(株)（元海岸研究室部外研究員）		松 尾 和 男
日本テトラポッド(株)応用水理研究所		遠 藤 泰 司
〃		野 口 雄 二
〃		山 本 方 人
〃		綿 貫 啓
(株)間組土木本部海洋土木部		湊 隆次郎
〃		本 田 陽 一
技術本部技術研究所		沖 政 和
(株)大林組技術開発本部海洋技術部		藤 沢 康 雄
東洋建設(株)土木本部技術部		倉 田 克 彦
土木本部技術研究所		芳 田 利 春
〃		松 永 博 史
住友金属工業(株)鉄構技術部		中 山 種 清
〃 開発推進室		飯 村 修
〃 建設工学研究室		喜 田 浩
〃 開発推進室		柳 本 泰 伴
〃 設計技術室		北 村 卓 也
東亜建設工業(株)技術開発部		荻 野 秀 雄
〃 水理研究室		堺 和 彦
〃 設計部		水 野 敏 雄

戸田建設(株)土木技術開発室

//

//

//

//

//

清水建設(株)技術研究所

//

//

大崎研究室

大成建設(株)技術本部技術研究所

//

//

//

技術開発部海洋開発室

//

//

北 村 律太郎

梅 田 宏

添 田 弘 基

西 牧 均

甘 利 裕 二

佐 藤 敏 文

田 中 正 博

三 俣 正 和

大 山 巧

清 川 哲 志

茗ヶ原 義 彦

田 中 剛

勝 井 秀 博

中 塚 健 司

神 崎 正

古 川 圭 三

酒 井 雅 史

要旨

各種の海域制御構造物モデルの消波効果を2次元及び平面水理模型実験によって調べ、各モデルの消波性能を明らかにした。

キーワード：海洋開発，海域制御構造物，消波効果，透過率，反射率，共同研究

は じ め に

土木研究所では、沿岸域の有効利用を目指した MMZ 構想を推進するために、総合技術開発プロジェクト“海洋利用空間の創成・保全技術の開発”研究を昭和61年度より実施している。また、この総プロの一環として昭和61年8月より海岸研究室と民間企業14社との間で共同研究“海域制御構造物の開発－波浪制御に関する研究－”を行っている。その成果の第一報は既に“海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1)”として昭和62年2月にとりまとめた。本報告は、前報に続いて61年度の研究成果をとりとまとめたものである。

目 次

は じ め に

第1章	ま え が き	1
第2章	研 究 の 目 的	1
第3章	研 究 の 体 制	3
第4章	複列潜堤の透過および反射に関する研究 —— 日本テトラポッド㈱ ——	5
第5章	空気潜袋式没水型海域制御構造物の水理特性 —— ㈱間組 ——	19
第6章	複合消波機能を有する海域制御構造物に関する実験的検討(2) —— ㈱大林組 ——	31
第7章	球面浅瀬式没水型消波構造物の消波特性 —— 東洋建設㈱ ——	45
第8章	根入れ式鋼板セルを用いた海域制御構造物に関する実験的研究 —— 住友金属工業㈱・東亜建設工業㈱ ——	57
第9章	多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する研究(2) —— 戸田建設㈱ ——	81
第10章	フレキシブルマウンドの波浪制御効果に関する検討 —— 清水建設㈱ ——	91
第11章	斜板消波潜堤に関する研究 —— 大成建設㈱ ——	109
第12章	円形消波潜堤に関する研究 —— 大成建設㈱ ——	125
第13章	あ と が き	138

第1章 ま え が き

近年、週休2日制の定着等余暇時間の増大に伴い海洋性レクリエーションに対するニーズも増大している。一方わが国の海岸の状況を概観すると、内湾は埋立てが進み、レクリエーション面での海浜利用を行うにも利用対象となるべき海洋空間そのものが消滅している。

このため一般的状況として遠隔とはなるものの、外洋に面した海岸へと出て行かざるを得ない状況となっている。ところが外洋に面した海岸は海象条件が厳しいために、そのままの形では海浜利用がなかなか難しい。この意味から海洋性レクリエーション等の目的のために海浜を有効利用するためには、波浪、流れ、漂砂を制御する構造物の開発が必要である。

また多くの侵食海岸を持つわが国では、従来より海岸保全を目的として海岸線近くに異形ブロックを汀線と平行に設置する工法—離岸堤工法—が広く用いられてきた。この工法の有効性は確かに認められるものの、一方では景観が良好ではなく、利用空間が狭い等の欠点がある。このような条件のもとで侵食対策にも役立つような構造物の開発が必要である。

上記の必要性のもとに水深10~20mを対象とした、新しい消波構造物—海域制御構造物—の一部タイプの消波機能については既に第1報で報告した。本報告書は、潜堤タイプの構造物を中心として第1報で報告し得なかったタイプの構造物の消波機能等について、主に2次元水路実験を行った結果をまとめたものである。

第2章 研究の目的

本研究の目的は、海域制御構造物の開発である。このうち今回は9種類の構造物の消波機能の特徴を把握する。このため、主に2次元水理模型実験を行い各構造型式の透過率、反射率を求める。また、一部構造物については、重複波作用時における波力も求めた。なお、以下に共同研究の成果を第1報としてとりまとめた、土木研究所資料No.2454の目次を参考として示す。

(参 考)

土木研究所資料No.2454 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1)

はじめに

1. ま え が き
2. 研 究 の 目 的
3. 研 究 体 制
4. 海域制御構造物 2 次元消波実験 ——— 土木研究所 ———
5. 消波構造物の消波効果からみた分類 ——— 土木研究所 ———
6. 乱れと反射を利用した海域制御構造物に関する実験

—— 第 1 グループ ——

ス リ ッ ト 型 海 域 制 御 構 造 物	清 水 建 設 (株)
平 面 ト ラ ス 型 ”	飛 島 建 設 (株)
水 平 板 付 き ス リ ッ ト 型 ”	三 井 建 設 (株)
透 過 水 平 板 付 き ス リ ッ ト 型 ”	五 洋 建 設 (株)
改 良 空 気 密 閉 型 ”	清 水 建 設 (株)
中 詰 式 ”	大 成 建 設 (株)

7. 複合消波機能を有する海域制御構造物に関する実験 ——— (株) 大林組 ———
8. 多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する実験 ——— 戸田建設(株) ———
9. ハイブリッド式波浪制御構造物に関する実験 ——— 新日本製鉄(株) ———
10. 数値計算による海域制御構造物の静穏域創出効果 ——— 土木研究所 ———
11. あ と が き

図表一覧

付 録

第3章 研究の体制

本共同研究は、昭和61年度8月より海岸研究室と民間14社の間で行われている。民間14社は、以下の3グループに大別される。

第1グループ 乱れと反射を利用した海域制御構造物の開発

飛 島 建 設 (株)

清 水 建 設 (株)

三 井 建 設 (株)

五 洋 建 設 (株)

大 成 建 設 (株)

第2グループ 没水型消波構造物の開発

清 水 建 設 (株)

大 成 建 設 (株)

東 洋 建 設 (株)

日本テトラポッド(株)

(株) 間 組

東 急 建 設 (株)

第3グループ ハイブリッド型消波構造物の開発

(株) 大 林 組

住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)

(株) 神 戸 製 鋼

新 日 本 製 鉄 (株)

戸 田 建 設 (株)

本報告書はこのうち清水建設(株)、大成建設(株)、東洋建設(株)、日本テトラポッド(株)、(株)間組、(株)大林組、住友金属工業(株)・東亜建設工業(株)、戸田建設(株)の研究成果をまとめたものである。

第4章 複列潜堤の透過および 反射に関する研究

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明
研究員 村井 禎美

日本テトラポッド(株)応用水理研究所 遠藤 泰司
野口 雄二
山本 方人
綿貫 啓

4.1 まえがき

外洋に面する沿岸域を保全し、海洋レクリエーション等のための空間を創成するためには、水深が相当大きく、厳しい海象条件下でも波浪・漂砂を制御する海域制御構造物の開発が必要である。本研究は、スリット構造のセルラー函体の中詰材としてテトラポッドを用いた透過性の潜堤を複列に配置した場合の波浪制御効果を水理実験により検討し、海域制御構造物として実用化への第一歩としたものである。潜堤は、大波浪をその天端上で砕波させ、その背後を内湾的な静穏海域とするとともに、雄大な外洋性砂浜海岸の景観を損なうことがなく、また潜堤自体は生物相に富む岩礁ともなる。複列潜堤とすることで、潜堤間の反復反射の位相干渉を利用して消波効果を増大させ^{1),2)}、さらに沖側潜堤で大波浪の制御が、岸側潜堤で海域利用目的に応じた波浪の制御が期待できる。なお、本研究では構造物の消波機能の目標として透過率を $K_T \leq 0.6$ 、反射率を $K_R \leq 0.5$ とした。

4.2 構造形式

水理実験の対象とした構造物は、図 4.1 に示すスリット構造のセルラー函体にテトラポッド（現地で 6.3 t 型）の中詰した構造物で、それを捨石マウンド上に据付けた透過性着底式構造物である。本実験では、従来の離岸堤の設置水深より相当大きい水深 10 m を対象とし、波高 1 ～ 4 m と通常の時化時以下の波浪条件下で波浪制御効果を検討した。

単一潜堤の場合、堤体天端が水面下、静水面および静水面上に位置する場合について実験を行った。複列潜堤については沖側、岸側とも同一構造ではあるが沖側潜堤が大波浪を砕波減衰させる事を想定し、岸側堤体幅を沖側に比べ 7 割の幅と狭くし、天端高は沖・岸とも同一か岸側を高くした。

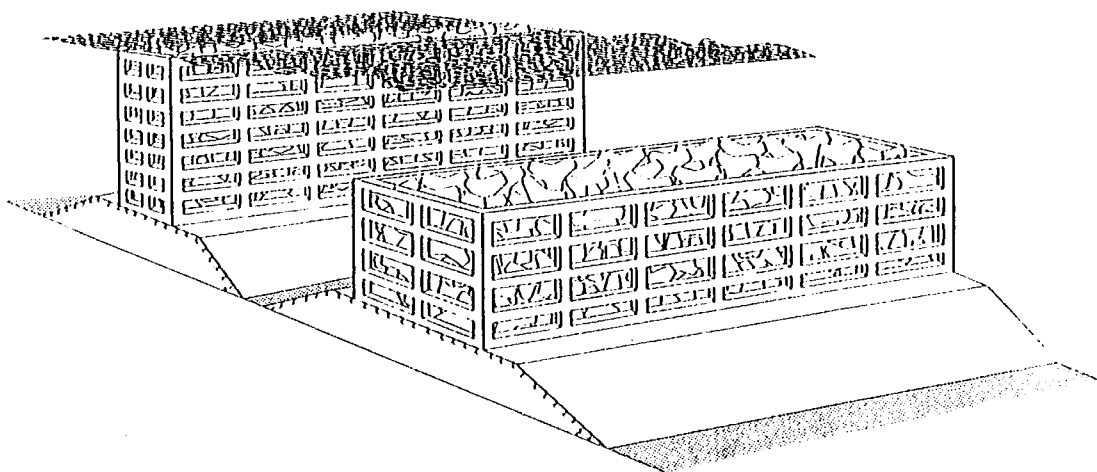


図 4.1 透過性潜堤（複列潜堤）

4.3 実験方法

実験には日本テトラポッド(株)応用水理研究所内の長さ50.0 m, 幅1.0 mおよび高さ1.0 mの片面ガラス張りの2次元造波水路を用いた。図4.2に示すように水路端には最大発生波高40 cm, 周期0.5~5.0 secの造波機を, 模型堤体背後の水路端には消波装置を設けてある。模型堤体を水深40 cmの水平床に設置し, 堤体沖側端より45 mを水平床とし, そこより沖側14 mを1/50勾配の一樣斜面とし, 水深7.45 cmの水路床に接続した。堤体沖側端より造波板までの距離は29.5 mである。

実験波は全て規則波であり, 反射率 $K_R = H_R/H_I$ は, 造波板より9 mの地点に設置した波高計を用い合田らの方法³⁾により入射波と反射波に分離して求めた。伝達波は堤背後4 mの地点に設置した波高計により測定した。透過率 K_T は堤体位置での通過波高を入射波高 H_I とし, 透過波高 H_T との比 $K_T = H_T/H_I$ とした。

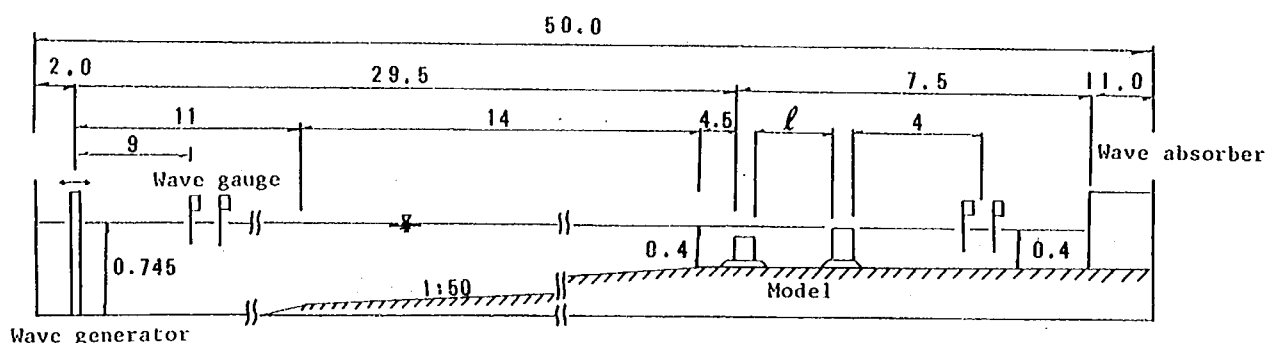


図4.2 実験装置 unit ; m

4.4 潜堤の構造条件および実験ケース

堤体諸元を図4.3に示す。模型は縮尺を1/25と想定したもので実験条件の現地量と模型値は表4.1の通りである。単一および複列潜堤とも基本構造は同一であり, 函体は底版のないスリット構造とし, その開口比 ϵ_s は40%, 中詰材は重量368 gのテトラポッドであり, その空隙率 ϵ_b は50%である。設置水深 h は40 cm, 捨石マウンド高は8 cmの一定とした。

表4.1 実験条件

諸 元	現 地	模 型 値
水 深 h	10 m	40 cm
波 高 H_I	1 ~ 4 m	4 ~ 16 cm
周 期 T	6 ~ 14 sec	1.2 ~ 2.8 sec
潜堤天端高 R	3, 0, -3 m	12, 0, -12 cm
潜 堤 幅 B	7 ~ 20 m	28 ~ 80 cm
潜 堤 間 隔 ℓ	12 ~ 81.25 m	48 ~ 325 cm

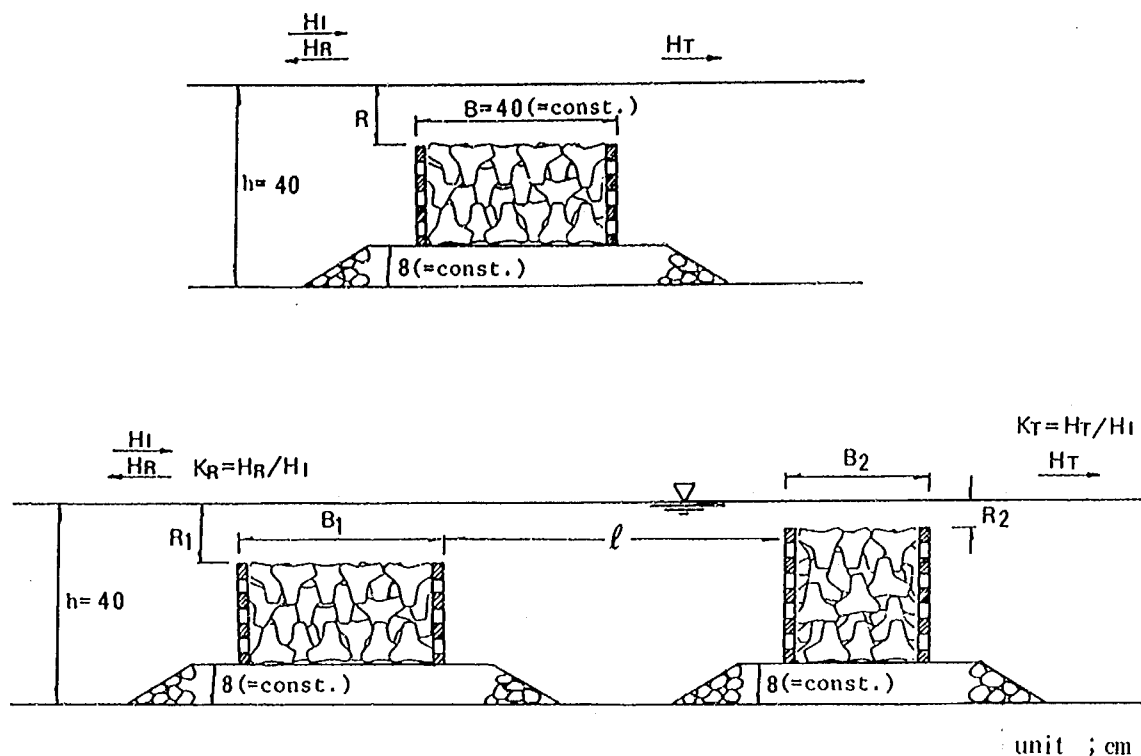


図 4.3 堤体諸元

4.4.1 単一潜堤

本構造物の基本的水理特性を知ることと、複列潜堤との比較のため単一潜堤についても若干の実験を行った。実験は潜堤天端高 R （静水面下方に正とする）を 12, 0, -12cm ($R/h = 0.3$, 0, -0.3) の 3 種とし、堤幅 B は 40cm ($B/h = 1.0$) として、表 4.2 に示す 15 波浪について行った。

表 4.2 実験波諸元

Wave No	T (sec)	$H\delta$ (cm)	L_o (cm)	L (cm)	$H\delta/L_o$	H/L	h/L
1	1.2	4.0	225	193	0.018	0.018	0.206
2	1.2	8.0	225	193	0.036	0.035	0.206
3	1.4	8.0	306	239	0.026	0.029	0.167
4	1.4	12.0	306	239	0.039	0.043	0.167
5	1.4	16.0	306	239	0.052	0.063	0.167
6	1.6	4.0	399	283	0.010	0.012	0.141
7	1.6	12.0	399	283	0.030	0.040	0.141
8	1.6	16.0	399	283	0.040	0.053	0.141
9	1.8	16.0	505	327	0.032	0.046	0.122
10	2.0	4.0	624	369	0.006	0.010	0.108
11	2.0	8.0	624	369	0.013	0.021	0.108
12	2.0	12.0	624	369	0.019	0.031	0.108
13	2.0	16.0	624	369	0.026	0.043	0.108
14	2.8	8.0	1223	535	0.007	0.018	0.075
15	2.8	12.0	1223	535	0.010	0.027	0.075

4.4.2 複列潜堤

実験は図 4.3 および表 4.3 に示すように沖側と岸側の潜堤間隔 ℓ を 48cm ~ 325cm で 11通り変え、天端高は沖側を $R_1=12\text{cm}$ ($R_1/h=0.3$) と一定とし、岸側はそれと同一か高いものとし $R_2=12, 0\text{cm}$ ($R_2/h=0.3, 0$) とした。堤幅は沖側 $B_1=40\text{cm}$ 、岸側 $B_2=28\text{cm}$ ($B_1/h=1.0$, $B_2/h=0.7$) および $B_1=80\text{cm}$, $B_2=56\text{cm}$ ($B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$) の 2通りについて行った。周期は表 4.3 に示すように $T=1.2, 2.0\text{sec}$ を選んだ。

表 4.3 複列潜堤実験ケース

ℓ (cm)	$T=1.2\text{sec}$		$T=2.0\text{sec}$		
	$H_0=4\text{cm}$	$H_0=8\text{cm}$	$H_0=8\text{cm}$	$H_0=12\text{cm}$	$H_0=16\text{cm}$
48	○	○	○	○	○
64 or 73	○	○	○	○	○
89	○	○	○	○	○
105	○	○	○*	○*	○*
120	○	○	○	○	○
140	○	○			
170	○	○	○	○	○
200	○	○	○	○	○
232			○	○	○
277			○	○	○
325			○	○	○

* : $B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$ の条件では実験は行っていない。

○ 64 or 73 : $B_1/h=1.0$, $B_2/h=0.7$ の条件では $\ell=73\text{cm}$ で実施し、
 $B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$ の条件では $\ell=64\text{cm}$ で実施した。

4.5 潜堤の透過および反射特性に関する実験結果

4.5.1 単一潜堤

(1) 天端水深が K_T および K_R に及ぼす影響

図 4.4 と図 4.5 は、 K_T および K_R の R/H_0 に対する変化を B/L をパラメータとして示したものである。 K_T は $R/H_0 < 0$ (天端が静水面上に出る離岸堤の条件) で小さい値を示し、さらに R/H_0 が -3.0 まで減少するにつれて K_T は増大している。なお、この範囲の実験波は非越波であった。一方、 R/H_0

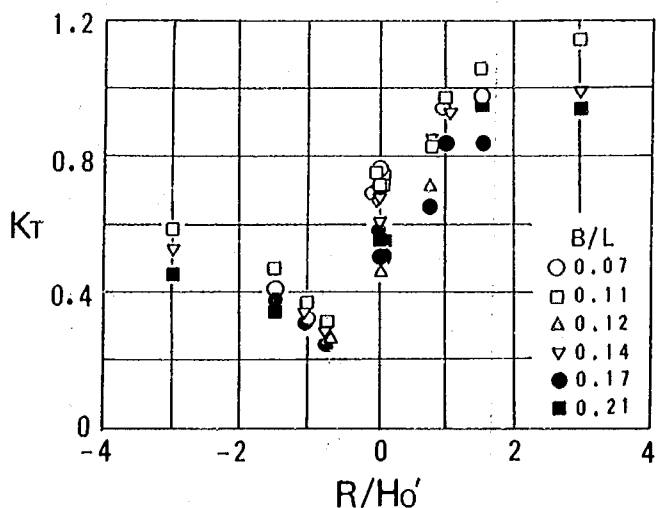


図 4.4 単一潜堤の K_T と R/H_0 の関係 ($B/h=1.0$)

が0から3.0(天端が静水面以下で潜堤の条件)に増加するにつれて、 K_T は0.5程度から1.2弱まで増大している。ここに、 $R/H_0' = 1.5$ および3.0では K_T が1.0を越えているが、これは入射波高が小さいことから、潜堤上での浅水変形によって波高が高くなったためと考えられる。一方、 K_R は R/H_0' が大きくなるとともに減少している。 $R/H_0' < 0$ では $K_R = 0.5 \sim 0.6$ でほぼ一定となっているが、 $R/H_0' > 0$ では0.1~0.3と小さい。

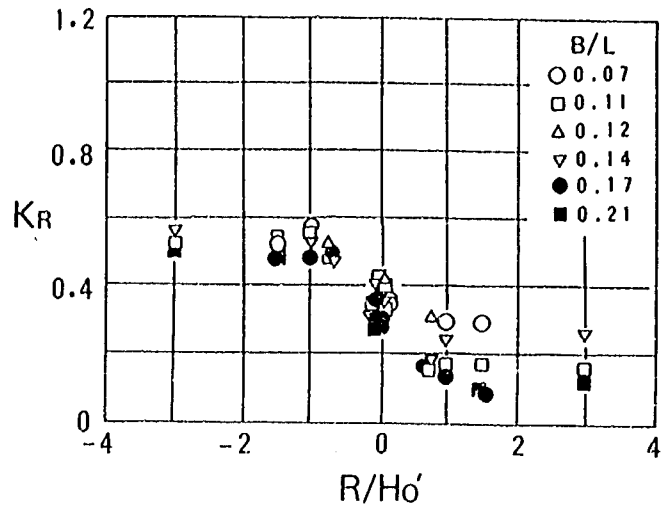


図4.5 単一潜堤の K_R と R/H_0' の関係($B/h=1.0$)

(2) 天端幅が K_T および K_R に及ぼす影響

図4.4と図4.5はパラメータに B/L をとっているので、天端幅の効果も知ることができる。同じ R/H_0' のデータを比較すると、全体的傾向として B/L が大きいほど K_T 、 K_R は小さくなっている。特に $R/H_0' \geq 0$ では、 B/L の効果は顕著であり、 B/L の値が0.1から0.2程度に増えると、 K_T 、 K_R は0.2前後減少する。本実験では堤体幅 B は一定としているので、周期の長い波ほど K_T と K_R が大きいことを示す。以上から $K_T \leq 0.6$ 、 $K_R \leq 0.5$ を満足する単一潜堤の諸元は、 $R/H_0' = 0.0$ 、 $B/L = 0.2$ 程度である。

(3) エネルギー損失率

$$K_L^2 = 1 - (K_T^2 + K_R^2) \quad (4.1)$$

で定義されるエネルギー損失率 K_L^2 と R/H_0' との関係を図4.6に示す。図中実線は $K_L^2 = 0.4$ で下限値 $K_T = 0.6$ 、 $K_R = 0.5$ とした場合の K_L^2 を示す。 K_L^2 は $R/H_0' = -0.8$ で最大となり、 $R/H_0' > 0$ (天端が静水面下の場合)になると小さくなる。また、全体的に B/L が大きいほど K_L^2 は大きい。 $R/H_0' < 0$ では、 $K_R = 0.5 \sim 0.6$ と大きいにもかかわらず、 $K_L^2 \geq 0.4$ となっているが、これは K_T が小さいことによる。なお、 $R/H_0' = 0.0$ 、 $B/L = 0.2$ 程度の条件では

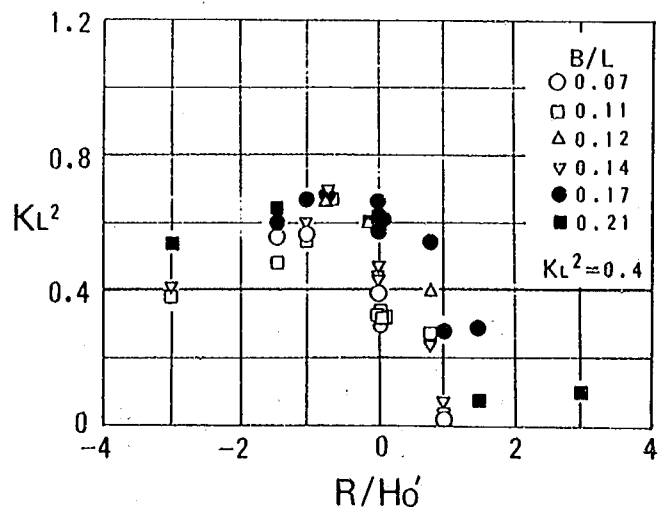


図4.6 単一潜堤のエネルギー損失率 K_L^2 と R/H_0' の関係($B/h=1.0$)

$K_T \approx 0.6$ となっている。

4.5.2 複列潜堤

(1) 潜堤間の位相干渉効果

図4.7～図4.10は、設置間隔 ℓ を変化させた場合の設置間隔波長比 ℓ/L と透過率 K_T および反射率 K_R の関係を、岸側潜堤の天端水深 R_2 と水深 h の比 R_2/h をパラメータにとり、示したものである。図4.7, 4.8は堤幅の狭い場合、図4.9, 4.10は堤幅の広い場合である。また、図中の破線は K_T の上限値($K_T=0.6$)と K_R の上限値($K_R=0.5$)を示す。

これらの図では、複列潜堤の K_T , K_R は、松見ら¹⁾および青木ら²⁾が指摘しているように、 ℓ/L の変化に伴い極大値・極小値が交互に現れている。これは潜堤間の反復反射による位相干渉効果によるものである。これらの極大値・極小値の現れる ℓ/L の値は R_2/h にはほとんど影響されない。特に K_R の極値の現れる ℓ/L の値は、 R_2/h に関係なくほぼ一致している。 K_T と K_R の極大値・極小値の現れる間隔を松見ら¹⁾は $\ell/L=1/4$ 間隔であるとしている。本実験では、 K_R についてはその傾向は見られるが、 K_T ではさほど明瞭ではなく、 K_T の極大値が現れる ℓ/L と K_R の極小値が現れる ℓ/L は必ずしも一致していない。さらに、同じ堤体条件で h/L の異なる図4.7と図4.8を比べると、 K_T と K_R の極大値・極小値の現れる ℓ/L の値は異なっている。本実験では $h=40\text{cm}$ で一定としているので、 K_T と K_R の極大値・極小値の現れる ℓ/L の値は周期

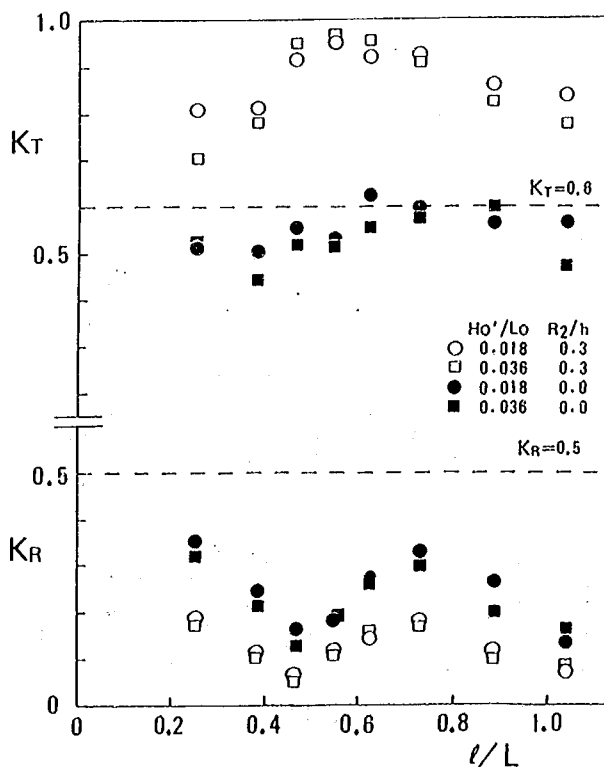


図4.7 複列潜堤の K_T , K_R と ℓ/L の関係
($B_1/h=1.0$, $B_2/h=0.7$, $h/L=0.206$)

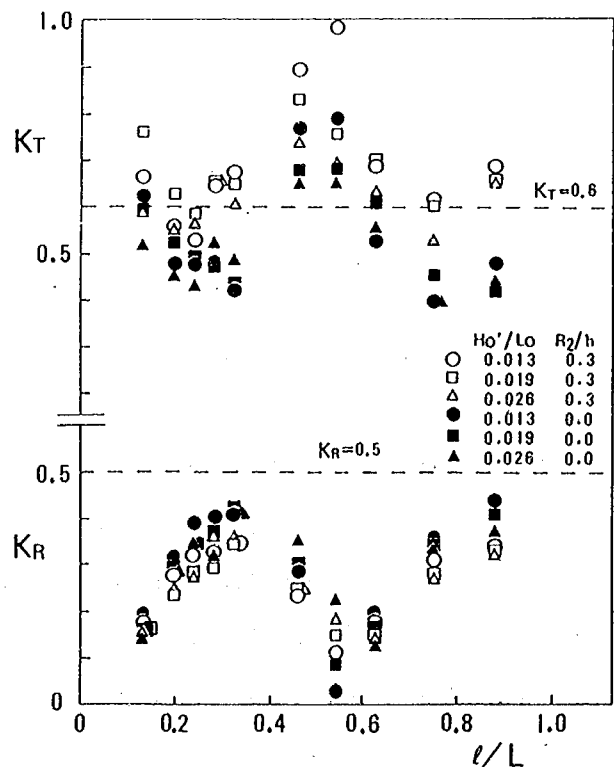


図4.8 複列潜堤の K_T , K_R と ℓ/L の関係
($B_1/h=1.0$, $B_2/h=0.7$, $h/L=0.108$)

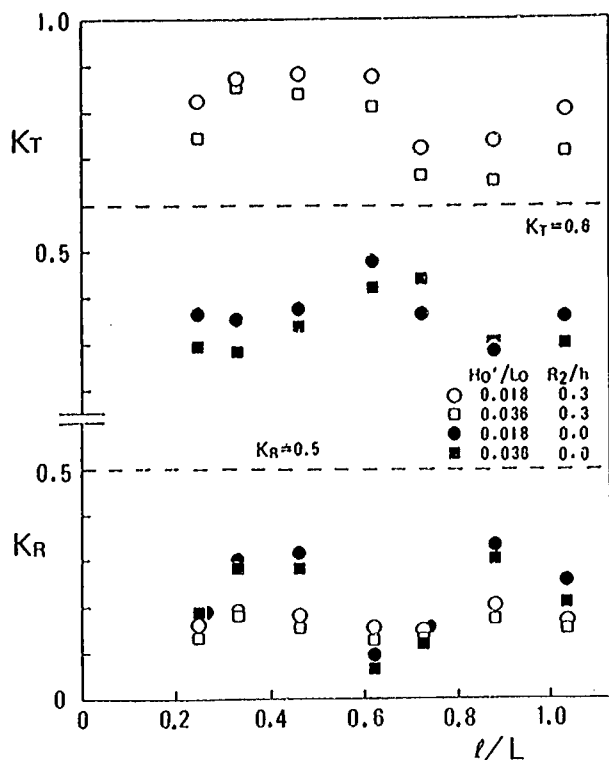


図4.9 複列潜堤の K_T , K_R と l/L の関係
($B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$, $h/L=0.206$)

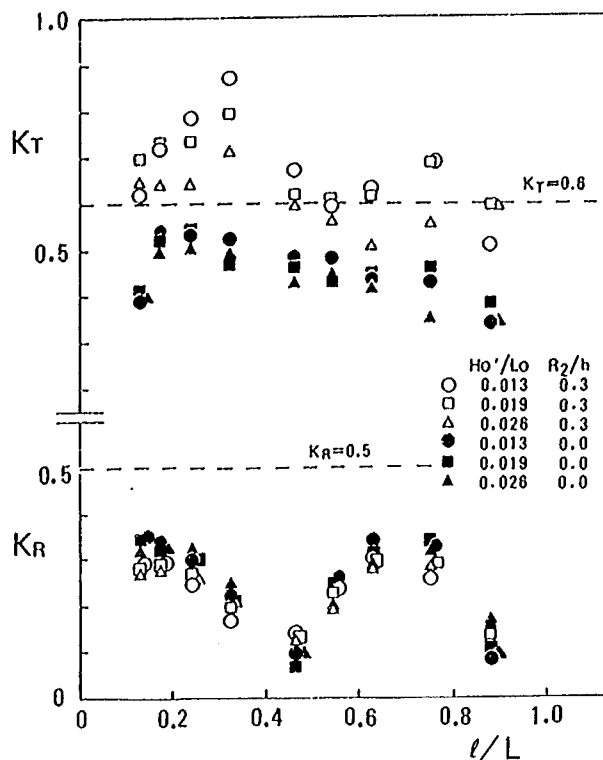


図4.10 複列潜堤の K_T , K_R と l/L の関係
($B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$, $h/L=0.108$)

によって異なることを示す。

以上のように、複列潜堤での消波効果は潜堤の設置間隔および入射波の周期によって大きく異なる。複列潜堤を設計する場合、実験範囲のすべての l/L に対しても所要の消波効果を期待するとすれば、 $K_R \leq 0.5$ についてはすべてのケースで満足するが、 $K_T \leq 0.6$ を満足するのは $B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$, $R_1/h=0.3$, $R_2/h=0$ (図4.9, 4.10) の場合となる。なお、図4.7, 4.8の堤体幅の狭い条件でも適当な l/L の場合では、 $K_T \leq 0.6$ の消波効果が期待でき、特に K_R が非常に小さくなる。

(2) 岸側潜堤高の効果

図4.7～図4.10において、同じ l/L のとき R_2/h が0.3から0.0に減少すると、 K_T は0.2～0.4と大きく減少し、 K_R はわずかに増大している。図4.7, 4.8は潜堤幅の狭いケースで $B_1/h=1.0$, $B_2/h=0.7$ とした場合の結果であるが、 $h/L=0.206$ (図4.7) では R_2/h が0.3から0になると K_T は0.2～0.5減少し、 K_R は0.1～0.2増大する。これに対し $h/L=0.108$ (図4.8) では同じ条件で K_T は0.1～0.2減少し、 K_R は0～0.1増大する。これより h/L が大きいほど R_2/h による K_T の減少する割合が大きく、 K_R の増大する割合が大きいことがわかる。この傾向は、潜堤幅の広い $B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$ とした場合の図4.9, 4.10の比較でも見られる。なお、本実験では $h=40\text{cm}$ で一定としていることから、岸側潜堤の天端高 R_2/h の効果による K_T の減少の割合は短い周期の波の方が大きいことを示す。

図4.7～図4.10の各図では、波形勾配 H_0'/L_0 ごとに図中の記号を変えてある。全体的傾向として、同じ天端高 (R_2/h) であっても、 H_0'/L_0 が大きくなると、 K_T, K_R が減少している。この傾向は $h/L=0.108, R_2/h=0.3$ の場合の K_T (図4.8, 図4.10の白印) で顕著であり、 $H_0'/L_0=0.013$ から 0.026 と2倍になると、 K_T は $0 \sim 0.3$ 程度の減少を示す。図4.7～図4.10の各図はそれぞれ入射波の周期が同じ場合であることから、同じ堤体条件では H_0' が大きいほど K_T は減少することを示している。したがって、本実験と同じ周期で、さらに大きな波高を作用させた場合には、本実験結果よりさらに小さい K_T となる可能性がある。

(3) 潜堤幅の効果

図4.11と図4.12は岸側潜堤高が高い場合 ($R_2/h=0$) の、 K_T, K_R の ℓ/L に対する変化を、沖側と岸側の潜堤幅の和と波長の比 $(B_1+B_2)/L$ をパラメータにとって示したものである。各図は h/L ごとにまとめた。これらの図から、 K_T と K_R の極大値・極小値の現れる ℓ/L の値は $(B_1+B_2)/L$ によって異なっていることがわかる。また、 $(B_1+B_2)/L$ が大きいと K_T の最大値は小さくなる。 $R_2/h=0.0, h/L=0.108$ の場合 (図4.12) では、 $(B_1+B_2)/L$ が2倍になると、 K_T の最大値で 0.25 程度小さくなっている。図には示さなかったが、岸側潜堤高が沖側潜堤と同一の場合 ($R_2/h=0.3$) でも同様な傾向が見られ、 $(B_1+B_2)/L$ が2倍になると K_T の最大値は 0.1 程度小さくなる。したがって、岸側潜堤高が高いほど、堤体幅あるいは $(B_1+B_2)/L$ の増大に対する K_T の減少の割合が大きい。

(4) エネルギー損失率

図4.13と図4.14に岸側潜堤高の高い場合 ($R_2/h=0.0$) のエネルギー損失率 K_L^2 と ℓ/L の関係を示した。パラメータには $(B_1+B_2)/L$ および H_0'/L_0 をとっているが、図中の白印は潜堤幅の狭い ($B_1/h=1.0, B_2/h=0.7$) ケースであり、黒印は広い ($B_1/h=2.0, B_2/h=1.4$) ケースを示す。また、図中の実線は $K_T \leq 0.6$ かつ $K_R \leq 0.5$ となる下限値 ($K_L^2=0.4$) である。 K_L^2 の値は ℓ/L によってことなるが、全体的な傾向として、同じ ℓ/L の値では、 H_0'/L_0 が大きいほど K_L^2 は大きい。なお、 $K_L^2 \geq 0.4$ を満足するのは $B_1/h=2.0, B_2/h=1.4$

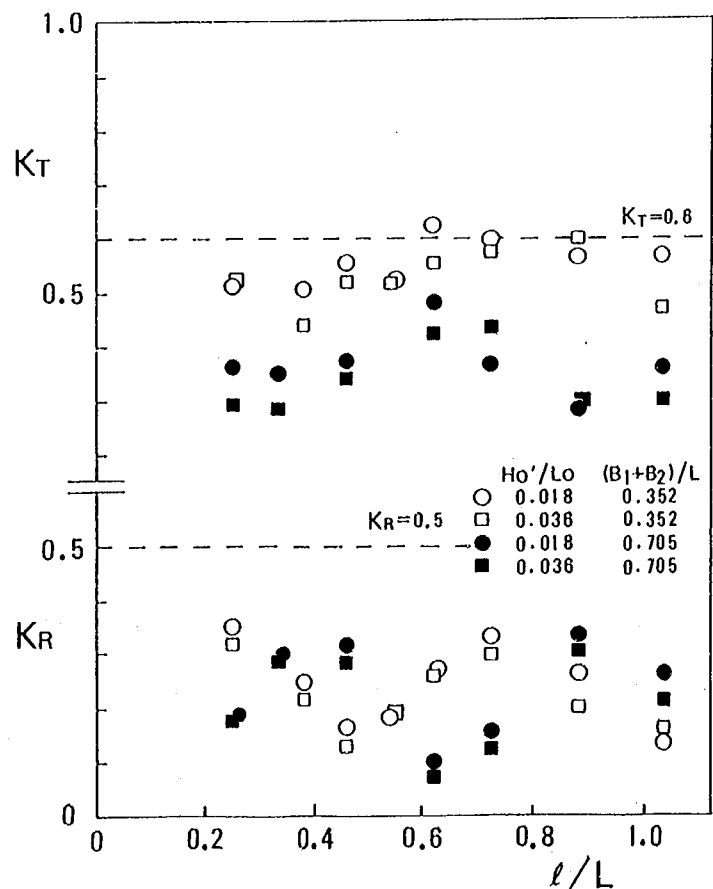


図4.11 複列潜堤の K_T, K_R と ℓ/L の関係
($R_2/h=0, h/L=0.206$)

($R_1/h=0.3$, $R_2/h=0.0$) の場合であるが、この堤体諸元のデータはすべて $K_L^2 \geq 0.6$ となっており、消波効果が高い。これは K_R が小さかったことによる。

4.5.3 透過率・反射率のまとめ

以上の実験から、通常時化時の波浪条件に対し、消波効果の目標 ($K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$) を満足する単一潜堤と複列潜堤の堤体諸元が明らかになった。以下に実験結果をまとめる。

(1) 単一潜堤

① $K_T \leq 0.6$ および $K_R \leq 0.5$ を満足するのは、 $R/h=0.0$ ($R/H_0' = 0.0$) で $B/L \geq 0.2$ となる条件である。また、この場合のエネルギー損失率は最大でも0.6前後である。

② 天端が水面上にある場合、非越波の状態では K_T は0.6以下となるが、 K_R は0.5以上となる。

③ 天端が水面下にある場合、 R/H_0' が大きくなると K_T も大きくなり、 $R/H_0' > 0$ では0.6以上となる。 K_R は R/H_0' が大きくなってもあまり変化せず、0.3以下である。

④ K_T および K_R は B/L が大きいと小さく、その変化の割合は K_T の方が大きい。

(2) 複列潜堤

① $K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$ および $K_L^2 \geq 0.4$ を満足する諸元は、 $R_1/h=0.3$, $R_2/h=0.0$, $B_1/h=2.0$, $B_2/h=1.4$ である。

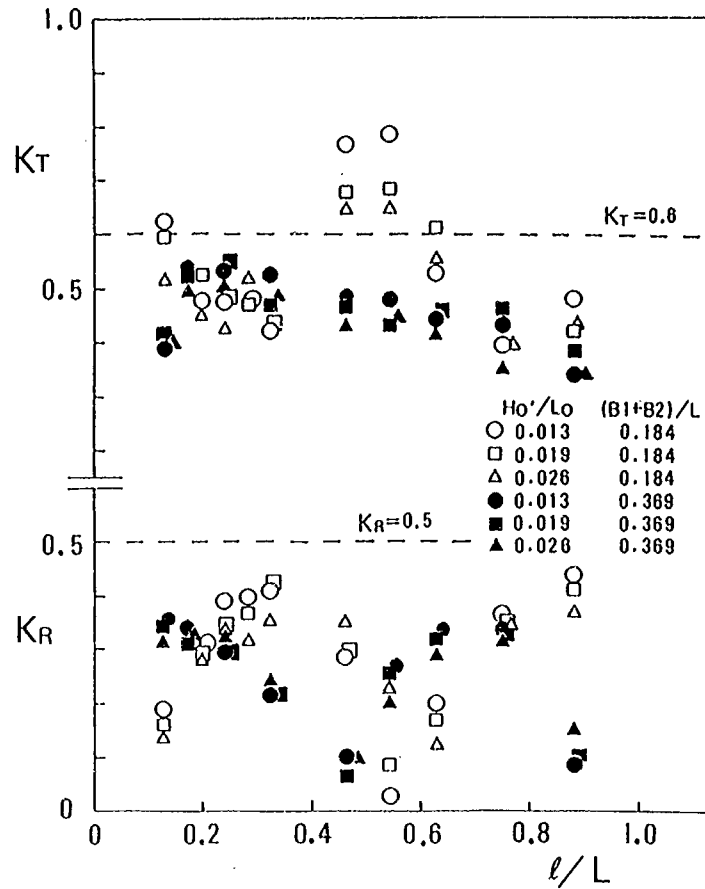


図 4.12 複列潜堤の K_T , K_R と l/L の関係
($R_2/h=0$, $h/L=0.108$)

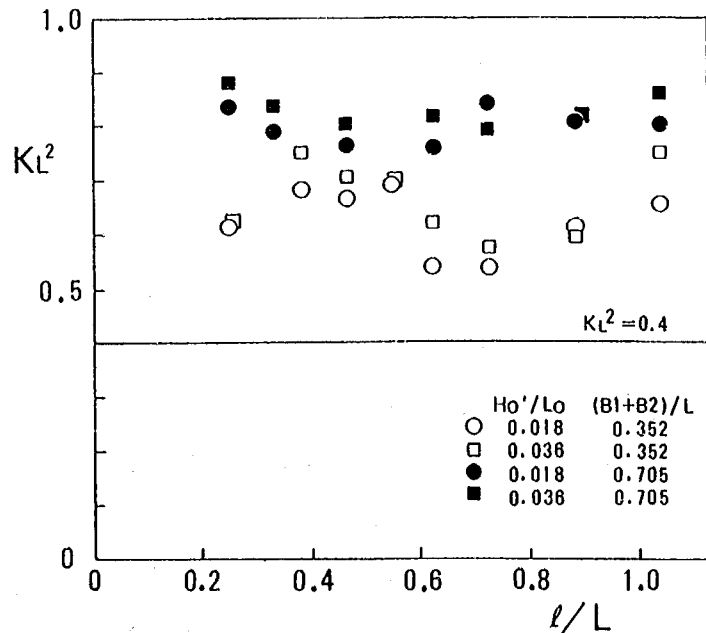


図 4.13 複列潜堤のエネルギー損失率
($R_1/h=0.3$, $R_2/h=0.0$)

② K_T および K_R は l/L に対して極大あるいは極小となるような顕著な変化を示す。極値が現れる l/L の値は岸側潜堤高 R_2/h にはさほど影響されないが、潜堤幅や波の周期によって異なる。

③ K_T が極大値(極小値)をもつ l/L で、必ずしも K_R は極小(極大)とはならない。

④ 岸側潜堤高を高くすると、 K_T は大きく減少する。この減少の割合は短い周期の波の方が大きい。

⑤ 同じ堤体条件で、入射波の周期が同じであれば、 H_0' が大きいほど K_T は減少する。

⑥ 潜堤幅が広いほど K_T は減少する。この減少の割合は岸側潜堤高が高いほど大きい。

⑦ 複列潜堤のエネルギー損失率 K_L^2 は l/L によって異なるが、上記①の条件を満足する堤体諸元に対しては、最小でも0.6であり、 l/L によってはかなりのエネルギー損失が期待できる。

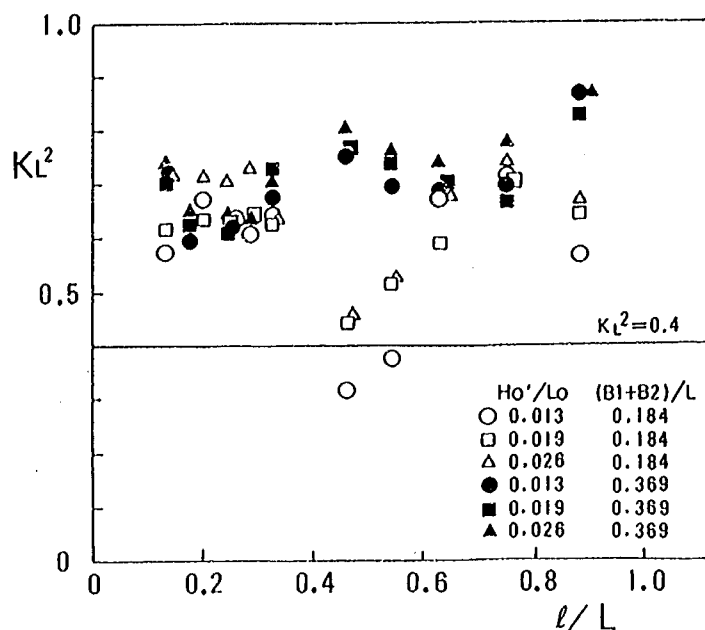


図 4.14 複列潜堤のエネルギー損失率
($R_1/h=0.3$, $R_2/h=0.0$)

4.6 今後の検討課題

① 複列潜堤は想定される大きな設計波に対して、波浪制御効果が大きくなると考えられるので、今後はその条件下で波浪制御効果を水理実験により検討する。

② 本研究では、スリットセルラー内の中詰材として標準的な空隙を持つテトラポッドを用いたが、今後は各種形状の中詰材の比較検討を行う。

③ 海域制御構造物は、沖合の波浪条件の厳しい海域に設置されるので、スリット函体および中詰材の耐波安定性と、スリット壁の構造的安定性を検討する必要がある。

④ 本研究は2次元規則波実験で、透過率・反射率を測定したが、それらは l/L により変化する。したがって、今後は不規則波による水理機能の確認と、3次元実験によって平面配列による透過波高および海浜流の変化の検討が必要となる。

⑤ 本構造物は、従来の離岸堤とは異なり沖合に建設されるものであるから、設置後の海浜変形を予測することも重要となる。また、マウンド法先の洗掘も考慮しなければならないので、今後、移動床実験等によりそれらを明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 松見吉晴・中原孝志・瀬山 明：有孔潜堤の消波効果について，第37回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 179～180，昭和60年．
- 2) 青木伸一・根木 亨：複列潜堤による波浪制御効果について，第39回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 313～314，昭和59年．
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港研資料，No. 248，24 p.，1976.

第5章 空気潜袋式没水型海域制御 構造物の水理特性

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明
研究員 村井 禎美

(株)間組土木本部海洋土木部

湊 隆次郎

本田 陽一

技術本部技術研究所

沖 政和

5.1 まえがき

本研究は空気潜袋式の没水型海域制御構造物について、波の反射および透過に関する実験を行い、その水理特性を明らかにしたものである。

5.2 構造形式概要

空気潜袋式の没水型海域制御構造物は空気潜袋、シリンダー（上端開口の円筒）、水平板、および下部構造からなっている（図 5.1）。空気潜袋は波の進行方向に通気管で連絡されており、図 5.2 の (B) に示すように、波の山および谷の下にある潜袋に作用する水圧差により空気が移動して潜袋が変形し、それによって発生する逆位相の Radiation Wave が透過波を相殺することによって消波を行おうとするものである。また、シリンダーは Radiation Wave の効果を増大させるためのものであると同時に、水粒子の乱れを引き起こすものである。水平板は空気潜袋、シリンダーを保持するため構造上必要な部材であるとともに砕波によるエネルギー損失を期待するものである。

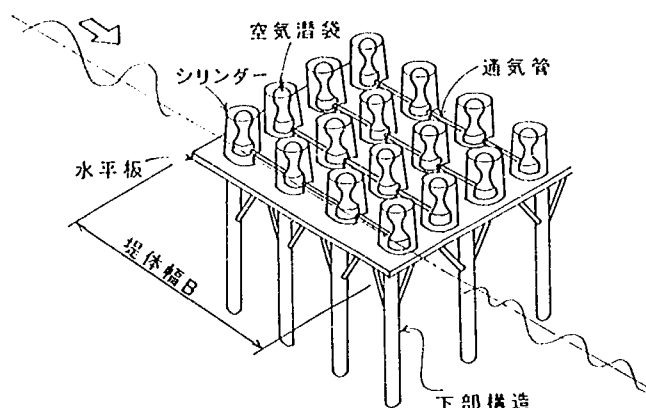


図 5.1 空気潜袋式没水型海域制御構造物

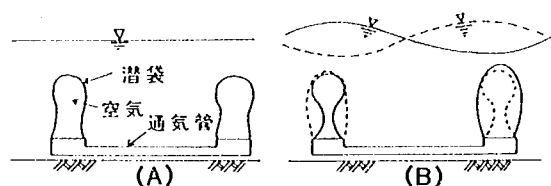


図 5.2 空気潜袋の構造と消波原理

5.3 実験方法

実験は側間組技術研究所の造波水路を用いて行った。水路は全長50m、幅0.8m、高さ1.5mで、造波機は電動機駆動のピストン型造波機である。水路は図 5.3 に示すように、造波板より16mは水深1.1m、さらに6mは1/10の一樣勾配で、その先

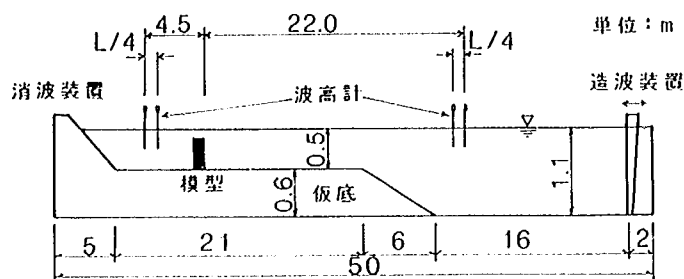


図 5.3 実験水路

21 mは水深0.5 m,そして水路端は碎石による消波斜面となっている。模型設置位置は造波板より35.5 mの位置である。波高の計測は模型の沖側22 m,岸側4.5 mの位置に容量式波高計を各2本ずつ設置して行った。測定された水位データをD D T処理後,合田らの方法¹⁾を用いて入反射分離し,入射波高(H_I),反射波高(H_R)を求めた。なお,模型前面での H_I , H_R を算出するためには波の減衰を考慮している。更にこれらの結果を用いて透過率 K_T (H_T/H_I),反射率 K_R (H_R/H_I)を求めた。なお実験縮尺は1/20である(表5.1参照)。また実験に用いた波は表5.2に示す19種で,すべて規則波である。

表5.1 現地と模型との対比

諸 元	実 物	模 型
水 深	10 m	50 cm
波 高	1 m ~ 4 m	5 cm ~ 20 cm
周 期	4 sec ~ 10 sec	0.89 sec ~ 2.24 sec

表5.2 実験波の条件

周 期 T (sec)	波 高 H (cm)	波 長 L (cm)	波形勾配 H / L	相対水深 h / L
0.89	5	123	0.041	0.407
0.89	10	123	0.081	0.407
1.01	5	153	0.033	0.327
1.01	10	153	0.065	0.327
1.12	5	183	0.027	0.273
1.12	10	183	0.055	0.273
1.34	5	242	0.021	0.207
1.34	10	242	0.041	0.207
1.57	5	299	0.017	0.167
1.57	10	299	0.034	0.167
1.57	15	299	0.050	0.167
1.57	20	299	0.067	0.167
1.79	5	354	0.014	0.141
1.79	10	354	0.028	0.141
1.79	15	354	0.042	0.141
1.79	20	354	0.056	0.141
2.24	5	462	0.011	0.108
2.24	10	462	0.022	0.108
2.24	15	462	0.033	0.108

5.4 構造条件

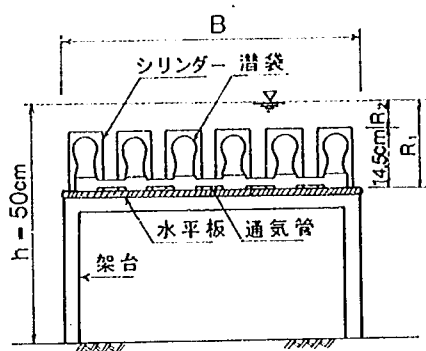
実験は表5.3に示すように,堤体幅Bと水平板の没水深 R_1 を変化させ,またシリンダーの有無,

潜袋の有無により計9種類の構造ケースについて行った。実験用模型は図5.4に示すように、架台上に水平板を設置し、その上に潜袋、通気管、シリンダーを取り付けた。潜袋には厚さ0.08mmの天然ゴム製の袋を用いた。

表5.3 構造条件

ケース名	潜袋の有無	シリンダーの有無	B (cm)	R ₁ (cm)	R ₂ (cm)	B/h	R ₁ /h	R ₂ /h
A12	有	有	50	15	0.5	1.0	0.3	0.01
A13	有	有	50	20	5.5	1.0	0.4	0.11
A22	有	有	75	15	0.5	1.5	0.3	0.01
A23	有	有	75	20	5.5	1.5	0.4	0.11
B22	無	有	75	15	0.5	1.5	0.3	0.01
B23	無	有	75	20	5.5	1.5	0.4	0.11
C21	無	無	75	10	—	1.5	0.2	—
C22	無	無	75	15	—	1.5	0.3	—
C23	無	無	75	20	—	1.5	0.4	—

備考



平面図

側面図

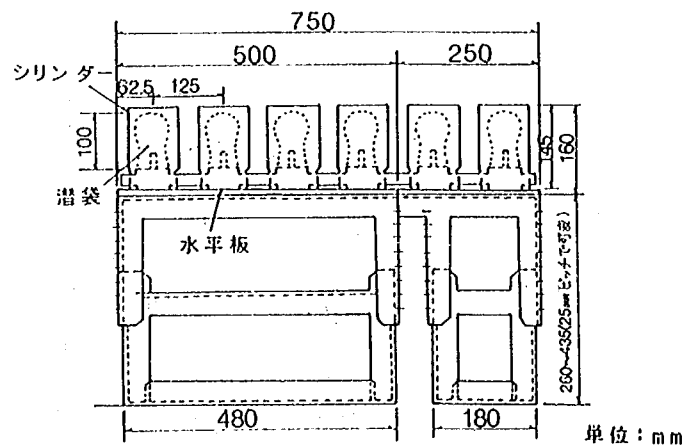
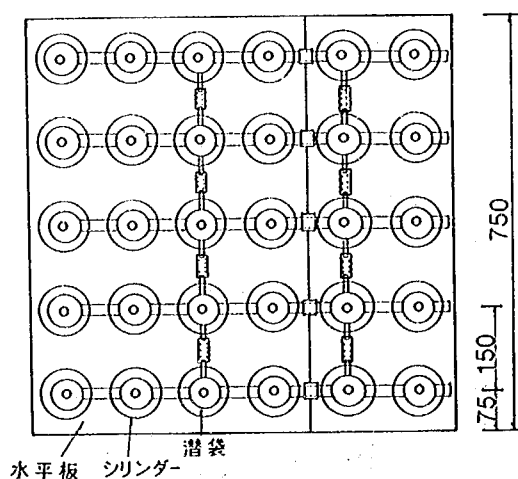


図5.4 実験模型

また、潜袋中の空気量は全潜袋容量の70%とした。潜袋の数は、模型の堤体幅 B が75cmの場合には波の進行方向に6個、 B が50cmの場合は4個とし、どちらの場合にも水路横断方向に5列並んでおり、 $B=75\text{cm}$ で合計30個、 $B=50\text{cm}$ で合計20個となる。

実験で検討する事項は下記の通りである。

- ① 潜袋、シリンダー、水平板それぞれの消波効果へ及ぼす影響
- ② 没水深 R_1 の消波効果への影響
- ③ 堤体幅 B の消波効果への影響
- ④ 波浪条件の消波効果への影響

5.5 透過および反射特性に関する実験結果

(1) 水平板の消波効果への影響

水平板 ($B=75\text{cm}$) のみの消波特性を調べるため没水深 R_1 と水深 h の比 R_1/h を0.2, 0.3, 0.4と変化させて実験を行った。波高を $H=5\text{cm}$ とした時の透過率 K_T , 反射率 K_R を図5.5に示す。透過率 K_T は R_1/h が小さいほど小さく、 $R_1/h=0.2$ の時、 $B/L=0.3$ 付近で最小(0.5)となる。しかし、 B/L が大きくなるとともに K_T は再び上昇し、 $K_T \leq 0.6$ となる範囲は、 $R_1/h=0.2$ の時で $0.22 < B/L < 0.41$ と狭い。この傾向は過去に実施された水平板の透過率の計算値、実験値²⁾ともほぼ一致している。また $R_1/h=0.3 \sim 0.4$ の時は水平板上で砕波現象は起こらないが、 $R_1/h=0.2$ の時は、 $0.25 < B/L < 0.5$ の範囲で水平板上で砕波現象が起こる。この範囲は K_T が0.6以下になる範囲とほぼ等しい。反射率 K_R は透過率 K_T と反対の傾向を示し、 R_1/h が

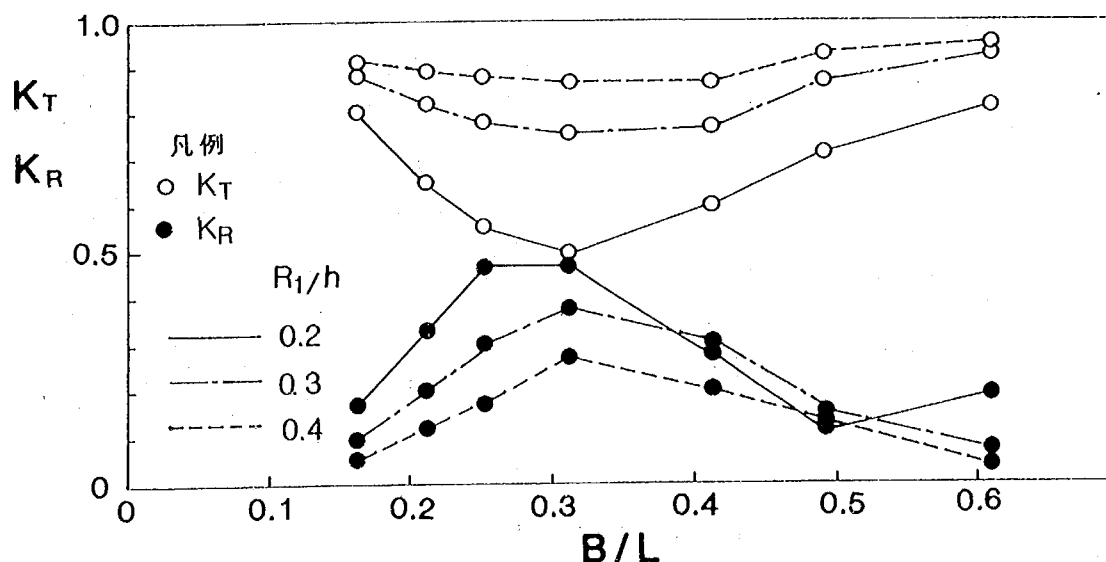


図5.5 水平板の没水深 R_1/h をパラメータとした時の B/L と K_T, K_R の関係 ($B=75\text{cm}$, $H=5\text{cm}$)

小さくなるほど大きな値となる。 $R_1/h=0.2$ の時、反射率 K_R は $B/L=0.3$ 付近で最大(0.45)となる。 R_1/h の変化による反射率 K_R の変化の割合は透過率 K_T に比べると小さい。

$H=10\text{cm}$ の時の実験結果を図 5.6 に示す。透過率 K_T は $H=5\text{cm}$ に比べると全体的に小さく、特に短波長域(B/L が大のとき)においてその傾向が著しく、 $R_1/h=0.2$ の時に $K_T \leq 0.6$ となる範囲は、 $0.2 < B/L$ と広い。 $R_1/h=0.4$ の時は水平板上で砕波することはないが、 R_1/h が小さくなるに従い、砕波するようになり、 $R_1/h=0.2$ の時は実験したすべての B/L で砕波現象が起こる。このため透過率はかなり小さくなる。

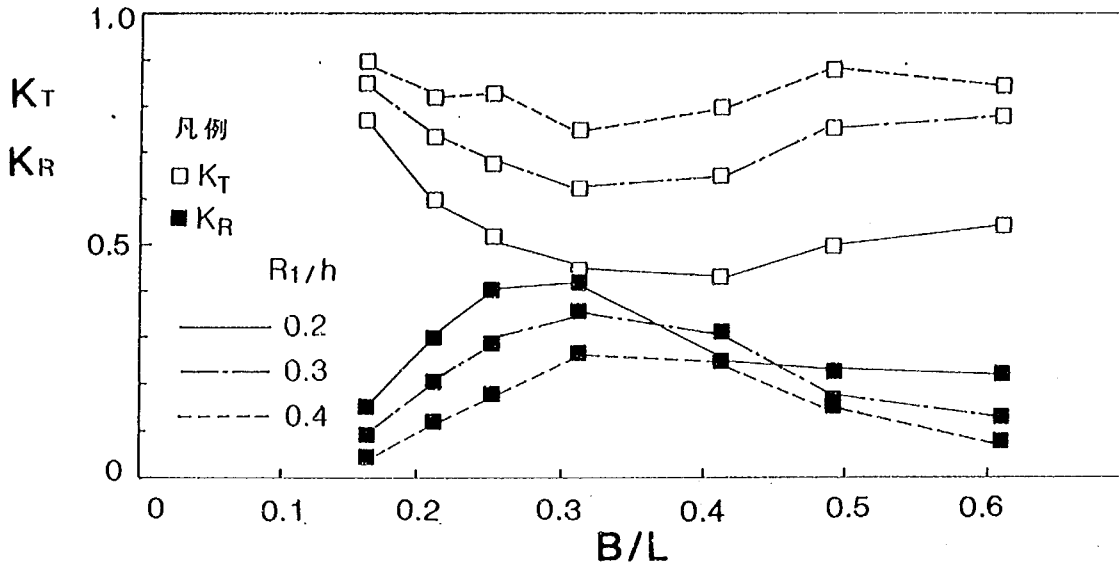


図 5.6 水平板の没水深 R_1/h をパラメータとした時の B/L と K_T, K_R の関係 ($B=75\text{cm}$, $H=10\text{cm}$)

(2) シリンダーおよび潜袋を付加した時の消波効果への影響

シリンダーおよび潜袋を付加した時の影響について述べる。図 5.7, 図 5.8 に模型構造を水平板のみ, 水平板+シリンダー, 水平板+シリンダー+潜袋と変化させた場合の K_T, K_R を, 横軸に幅波長比 B/L をとって示した。図 5.7 は $R_1=15\text{cm}$ の場合, 図 5.8 は $R_1=20\text{cm}$ の場合である。 $R_1=15\text{cm}$ の場合には, シリンダーによる消波効果は顕著であるが, 潜袋の効果はみられない。一方, $R_1=20\text{cm}$ の場合には潜袋の消波効果も表われている。シリンダーの消波機構は主に波の反射, 水粒子の乱れによるものであり, R_1 が小さい (シリンダーが水面に近い) ほど, この効果が顕著となるため, $R_1=15\text{cm}$ の場合の方がシリンダーによる消波効果が顕著にあらわれたものと考えられる。

一方, 潜袋による消波機構は潜袋上の水位差によって発生するものであり, 波による水面変動により潜袋の頭部が水面に露出する場合には Radiation Wave が有効に働かないと考えられる。このため, 図 5.7 ($R_1=15\text{cm}$) の場合は潜袋の効果が顕著でなく, 図 5.8 ($R_1=20\text{cm}$) の場合には潜袋の頭部が水面に露出することがないので Radiation Wave が有効に働き, 水平板+シリンダーの場合より, 水平板+シリンダー+潜袋の方が透過率 K_T で 0.1~0.15 小さな

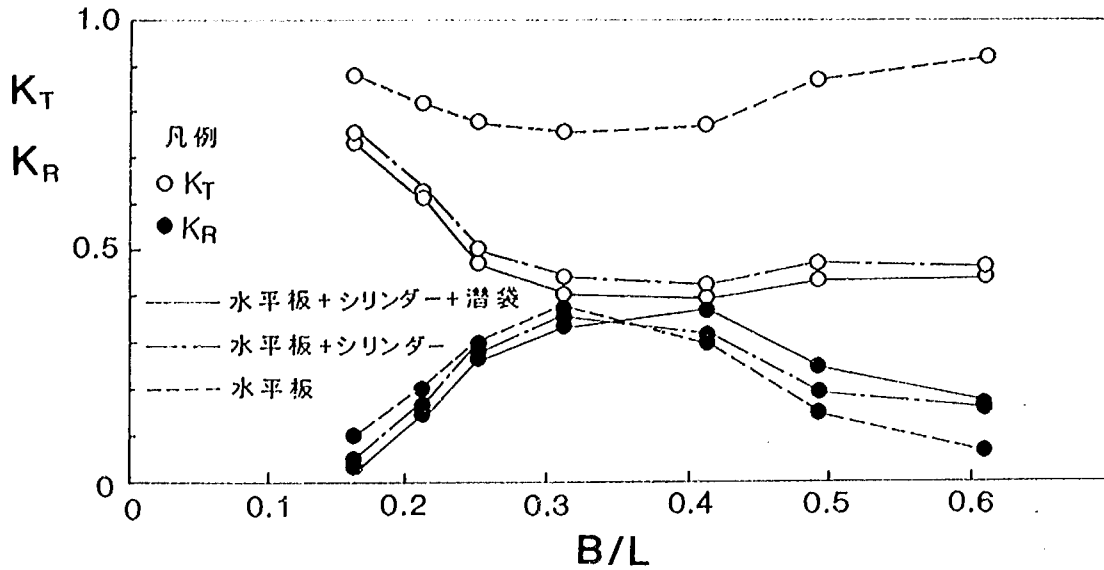


図 5.7 シリンダーおよび潜袋の有無をパラメータとした時の B/L と K_T, K_R の関係
($B=75\text{cm}$, $H=5\text{cm}$, $R_1/h=0.3$)

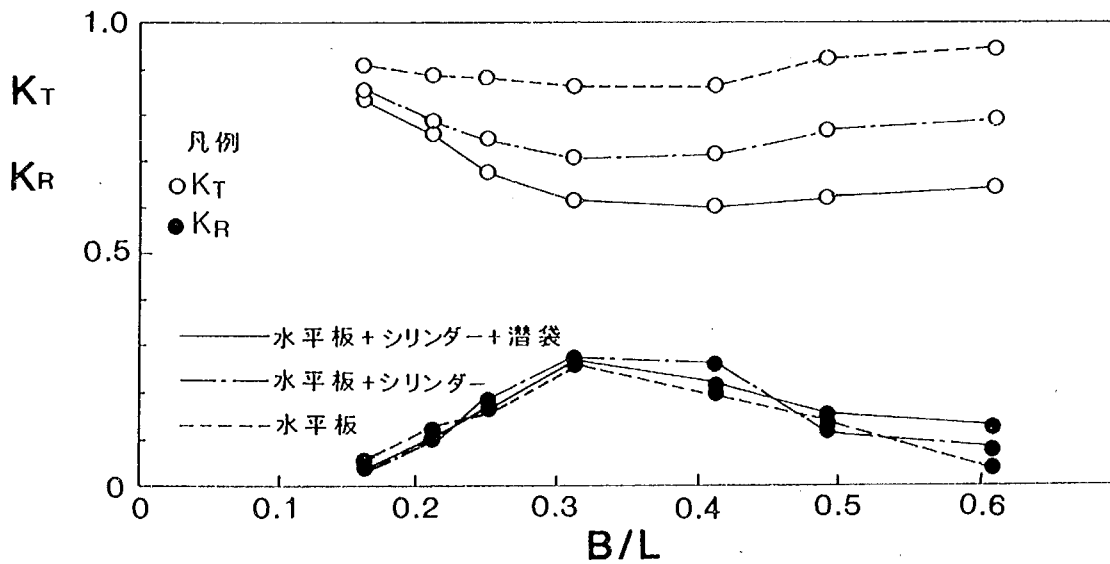


図 5.8 シリンダーおよび潜袋の有無をパラメータとした時の B/L と K_T, K_R の関係
($B=75\text{cm}$, $H=5\text{cm}$, $R_1/h=0.4$)

る結果になったものと考えられる。またシリンダーおよび潜袋を付加することにより、水平板のみの時にみられた $B/L=0.3$ 付近で K_T が極小値をもつという現象はなくなり、 $B/L \geq 0.3$ で K_T はほぼ一定となる。反射率 K_R についてみると、水平板単独の場合でもシリンダーや潜袋を付加した場合でもほぼ同じ値であり、最大でも 0.4 程度である。

没水深 $R_1=15\text{cm}$, 20cm , 波高 $H=5\text{cm}$, 10cm の場合について、波の谷から潜袋までの距離 ($R_2-H/2$) と潜袋が有ることによる透過率 K_T の減少分 (ΔK_T) の関係を図 5.9 に示す。この実験の範囲では、潜袋が常に水没している方が透過率 K_T の値を小さくすることがわかる。こ

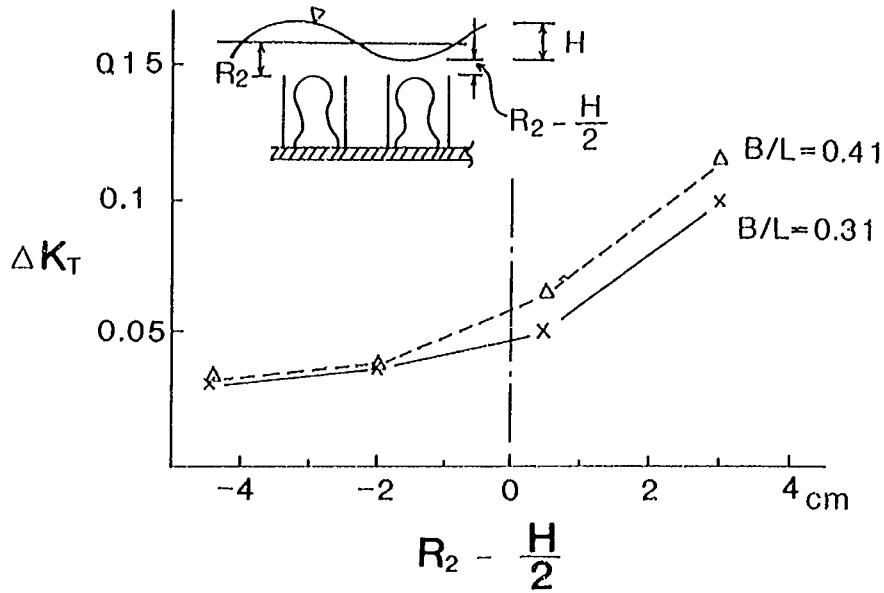


図 5.9 波の谷から潜袋までの鉛直距離 ($R_2 - \frac{H}{2}$) と透過率の減少分 (ΔK_T) の関係

こで，図中の波高 H は，模型設置地点で事前に計測した値としている。

(3) 堤体幅 (B) の消波効果への影響

水平板＋シリンダー＋潜袋の場合における堤体幅 ($B = 50\text{cm}$, 75cm) の消波効果への影響を図 5.10 に示す。透過率 K_T は， $B/L > 0.2$ で堤体幅の大きい方が小さくなり， $B/L < 0.2$ では堤体幅の影響は小さい。反射率 K_R の場合は，透過率 K_T の時ほど堤体幅 B の影響は顕著に表れていない。以上は没水深 $R_1 = 15\text{cm}$ の場合であるが，没水深 $R_1 = 20\text{cm}$ の場合もほぼ同様の傾向を示している。

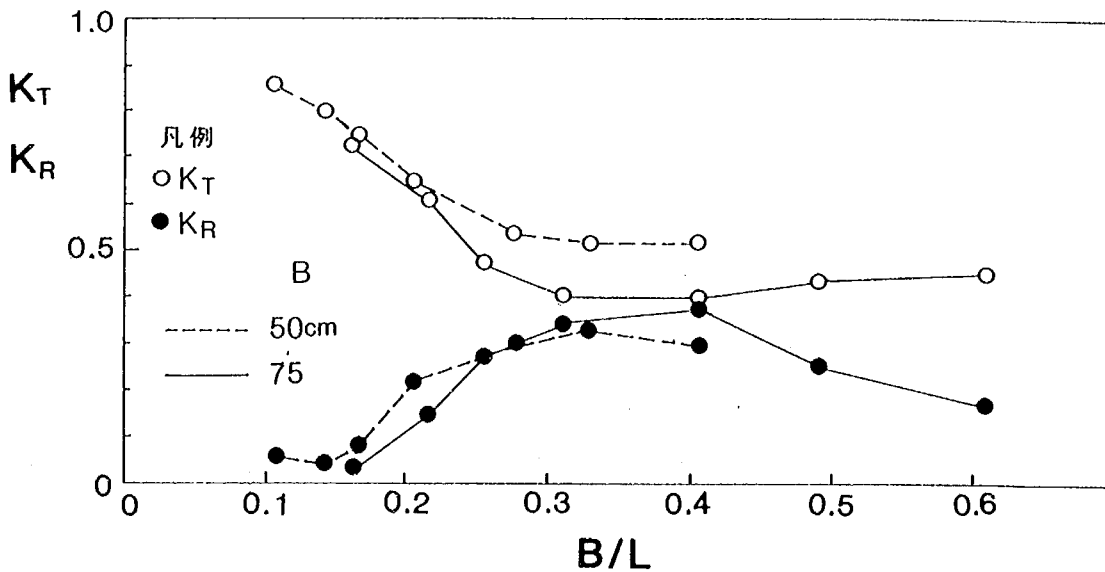


図 5.10 堤体幅 B をパラメータにした時の B/L と K_T, K_R の関係
($H = 5\text{cm}$, $R_1/h = 0.3$)

(4) 波高 (H) の消波効果への影響

水平板+シリンダー+潜袋の場合に波高 H を 5, 10, 15, 20cm と変えた時の K_T, K_R を図 5.11 に示す。この結果によれば、 H の変化が K_T に与える影響は小さい。なお $H = 5$ cm の場合は潜袋は完全に没水しているが、 $H = 10 \sim 20$ cm の場合には、潜袋の頭部が一部水面上に露出している。 K_R についても H の影響は小さい。

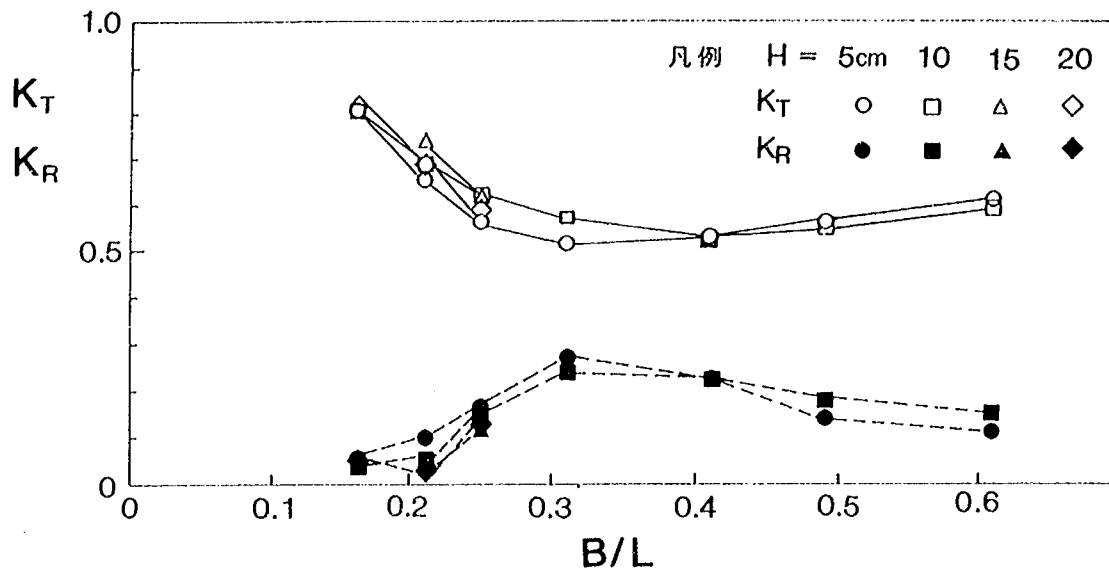


図 5.11 波高 H をパラメータとした時の B/L と K_T, K_R の関係

($B = 75$ cm, $R_1/h = 0.4$)

(5) まとめ

空気潜袋式没水型海域制御構造物の水理特性を以下にまとめる。

- ① 水平板単独の場合の透過率 K_T は、 $B/L = 0.3$ 付近で極小となるような周波数特性を持つが、シリンダーと潜袋を付加すると K_T が極小となった後は、ほとんど横ばい状態となる。
- ② 空気潜袋の消波効果と没水深 R_1 (または R_2) とは関係が深く、空気潜袋が波の谷の時に水面に露出すると、良い消波効果を得ることができない。空気潜袋の消波効果を高めるためには、波の谷が潜袋の上を通過する時に潜袋の頭部が露出しない程度の深さに潜袋を設置しておく方が良い。
- ③ 空気潜袋が一部水面に露出した場合は空気潜袋による消波効果はあまり期待できないが、代りにシリンダーによる消波効果が期待でき、総合すると実海域において潮位変動によりある程度没水深が変化しても平均的に良い消波効果が得られると考えられる。
- ④ 反射率 K_R は水平板、水平板+シリンダー、水平板+シリンダー+潜袋の場合ともほぼ同じで、最大でも 0.4 程度である。

5.6 今後の課題

(1) 消波効果

空気潜袋式没水型海域制御構造物の消波効果をさらに高めるためには、空気潜袋の特性を最大限に生かすことが重要である。そのため今後次の課題について再検討する必要がある。まず、潜袋の変形運動を最大とするような各部材（例えば通気管、シリンダー径など）の諸元について検討する。また、効率の良い潜袋配置の検討も必要である。

(2) 海浜変形

空気潜袋式没水型海域制御構造物を設置した場合の背後の海浜変形については、移動床実験を行い、その特性を把握する必要がある。

(3) 設 計

空気潜袋式没水型海域制御構造物に働く全波力、各部材に働く波圧などを水槽実験により明らかにし、設計法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治；不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，24 p.，1976.
- 2) 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），港湾技研資料，No.516，39 p.，Mar. 1985.

第6章 複合消波機能を有する海域制御 構造物に関する実験的検討(2)

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明

研究員 村井 禎美

(株)大林組技術開発本部海洋技術部 藤沢 康雄

6.1 まえがき

外洋に面した海域は、波浪条件が厳しく、流れや漂砂が活発である。そのような海域において、海洋空間の有効利用を図るためには、波、流れ、漂砂を制御する新しい海域制御構造物の開発が必要である。本研究は、波運動を流れや渦等の乱れに変換し、同時に若干の反射を組み合わせた複合消波機能を有する海域制御構造物を開発することを目的とする。前報¹⁾では、複合消波構造物の水平板間隔 W_B 、水平板没水深 h_2 、開閉角 θ などのパラメータが消波機能に及ぼす影響を2次元水理模型実験によって調べた。その結果、消波特性の良い模型形状の選択が可能となり、また、この基本実験より本実験で行うべき波浪条件が定まった。本実験では沖波波高を変えたときの透過率、反射率並びに複合消波構造物に作用する水平波力、鉛直波力、モーメント、波圧を測定し、複合消波構造物の水理学的特性および力学的特性について調べた。

6.2 水理模型実験

実験は、日本大学理工学部海洋建築工学科の2次元造波水路を使用して実施した。本実験における計測装置および水理模型の配置を図6.1に示す。

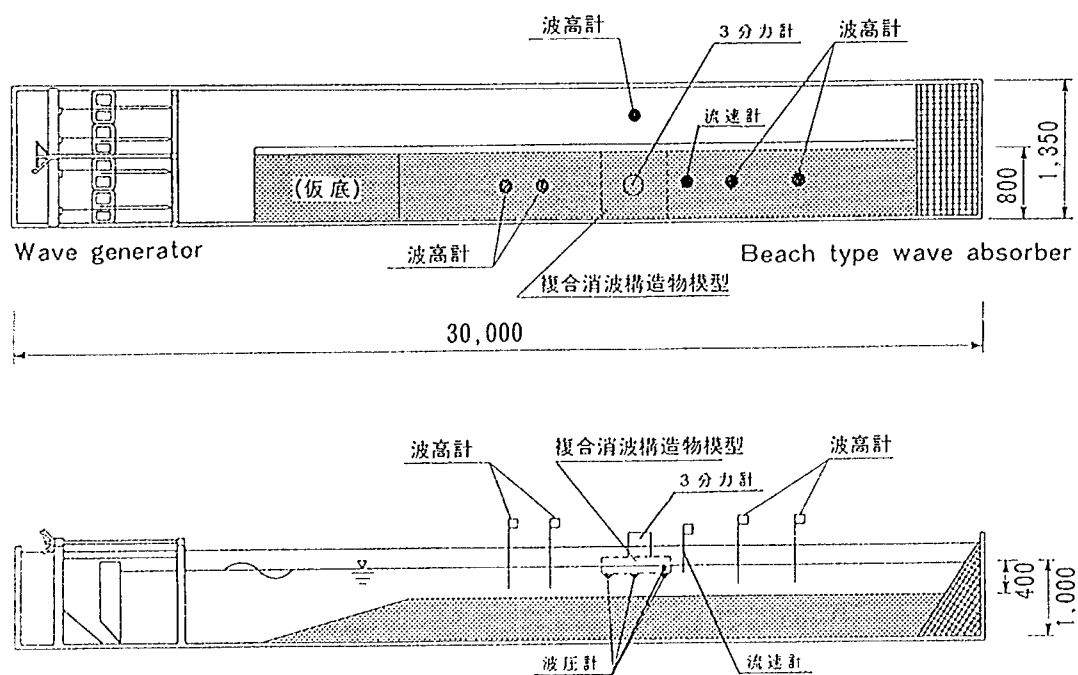
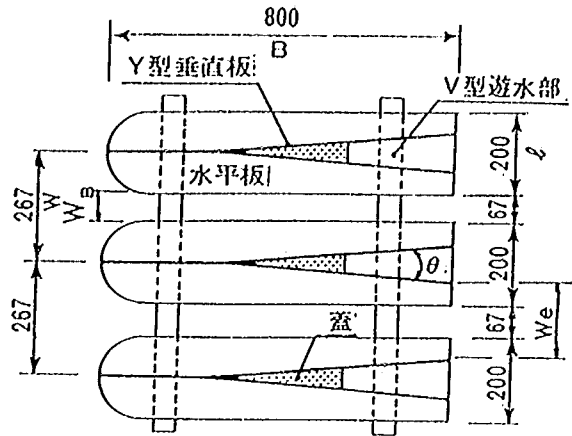


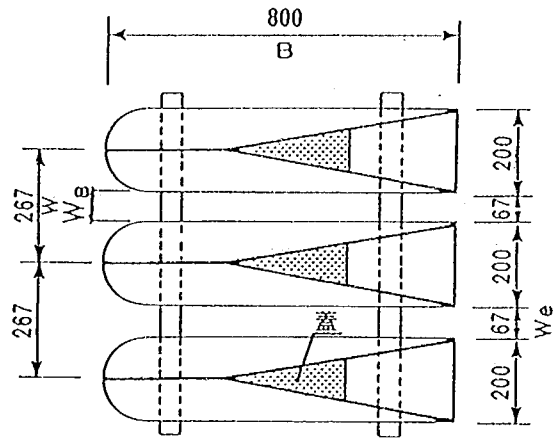
図6.1 2次元造波水路及び計測装置の配置

6.3 実験模型

本実験では、図 6.2 に示すように、水平板と Y 型垂直板からなる塩化ビニール製模型を用いた。ここに、隣接する水平板の間隔を水平板間隔 W_B と定義し、また、Y 型垂直板先端部の間隔 W に対する後端部の間隔 W_e の比を、Y 型垂直板の開口率 ε と定義した。開口率は 62.5 %、25 % と 2 種類変えた。さらに、V 型遊水部に導かれた水が上方へ跳ね上がるのを防止するために、V 型遊水部の上部に蓋を取り付けてある。模型の Y 型垂直板の開閉角 θ は、 $\theta = 11$ 度、21 度とし、それぞれ A タイプ、B タイプとした。また、実験模型の設置断面図を図 6.3 に示す。なお、模型実験の縮尺は 1/25 である。実験模型の諸元を表 6.1 に、また、実験に用いた 2 タイプの模型形状の諸元を表 6.2 に示す。



A タイプ 3 体模型



B タイプ 3 体模型

図 6.2 模 型 形 状

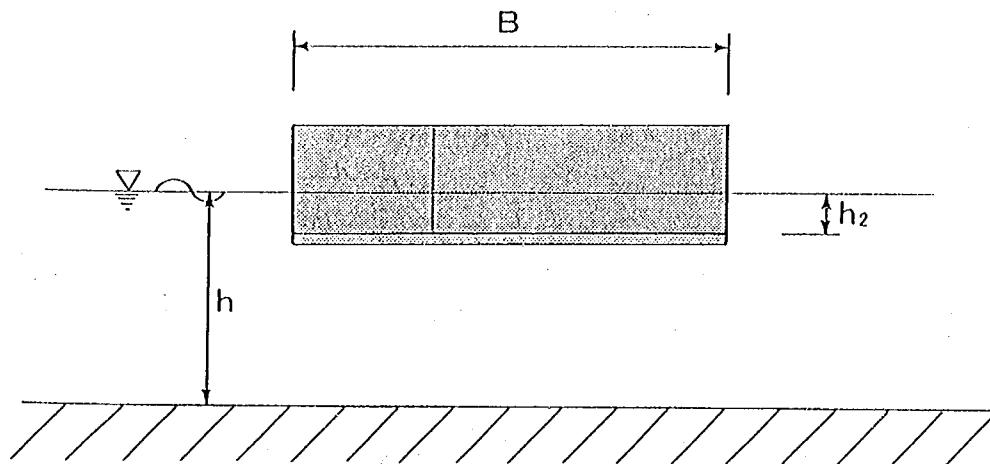


図 6.3 断 面 図

表 6.1 実験模型諸元

項 目	実海域	模型 (1/25)
水 深 (h)	10m	40cm
水平板長さ (B)	20m	80cm (B/h=2.0)
水平板幅 (ℓ)	5m	20cm ($\ell/h=0.25$)
水平板間隔 (W_B)	1.67m	6.7cm ($W_B/h=1/6$)
水平板没水深 (h_2)	1 m, 2 m	4 cm, 8 cm ($h_2/h=0.1, 0.2$)

表 6.2 模型形状諸元

模型形状名称	水平板間隔 W_B	開 閉 角 θ	Y型垂直板	開口率 ϵ (W_e/W)
Aタイプ模型	6.7 cm	11 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 16.7\text{cm}$	62.5 %
Bタイプ模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25 %

6.4 本実験の波浪条件

本実験の条件は、前報¹⁾の基本実験並びに土木研究所で実施した61年度実験条件を考慮して表 6.3 に示す波浪条件とした。

表 6.3 波 浪 条 件

周 期 T (sec)	沖波波高 H_0 (m)	沖波波長 L_0 (m)	沖波波形勾配 H_0 / L_0	入射波波長 L (m)	入射波波形勾配 H_1 / L	相 対 幅 B/L
1.0	0.04 0.08 0.12	1.56	0.051 0.103 0.154	1.46	0.030 0.057 0.088	0.516
1.2	0.04 0.08 0.12	2.25	0.036 0.071 0.107	1.94	0.019 0.040 0.064	0.413
1.4	0.04 0.08 0.12	3.06	0.026 0.052 0.079	2.39	0.018 0.034 0.052	0.335
1.6	0.04 0.08 0.12	3.99	0.020 0.040 0.060	2.83	0.013 0.028 0.043	0.282
1.8	0.04 0.08 0.12	5.05	0.016 0.032 0.048	3.27	0.013 0.025 0.037	0.245
2.0	0.04 0.08 0.12	6.24	0.013 0.026 0.039	3.69	0.011 0.023 0.031	0.217

6.5 本実験の結果と考察

6.5.1 複合消波構造物の透過率, 反射率

沖波波高 (4 cm, 8 cm, 12cm) を変えた場合の透過率 (K_T), 反射率 (K_R) の変化を模型条件ごとに示す (図 6.4 ~ 図 6.7)。図 6.4, 6.5 は A タイプ 3 体模型, 図 6.6, 6.7 は B タイプ 3 体模型である。縦軸は透過率 K_T と反射率 K_R を示し, 横軸は入射波長 L で無次元化された模型長さ B である。没水深変化による透過率, 反射率の変化について着目すると, A タイプ模型では,

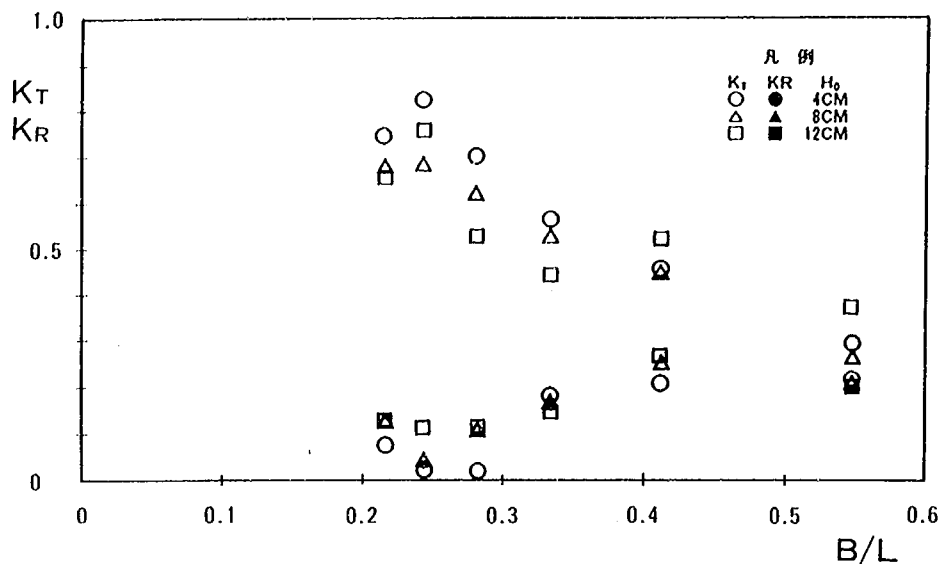


図 6.4 K_T, K_R と B/L の関係 (A タイプ, $h_2/h=0.1$)

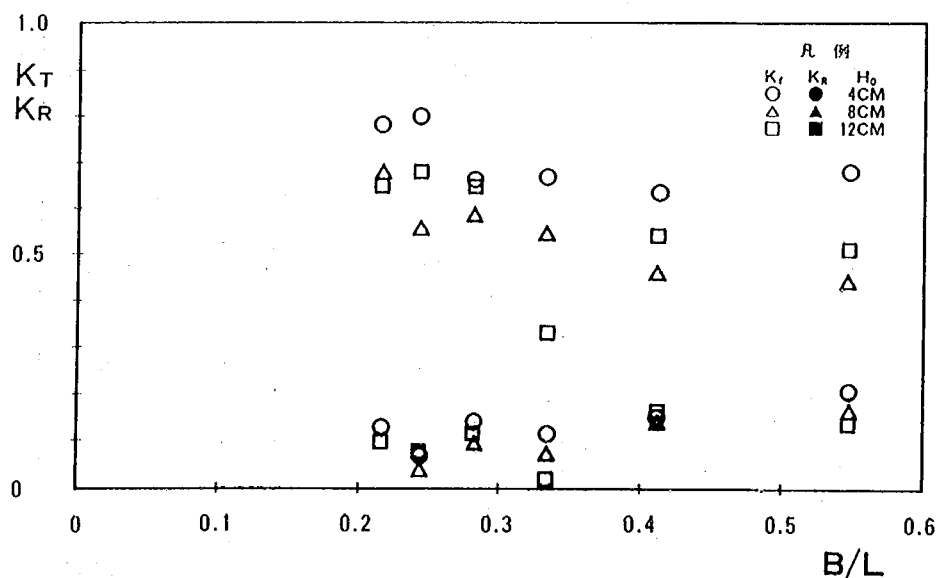


図 6.5 K_T, K_R と B/L の関係 (A タイプ, $h_2/h=0.2$)

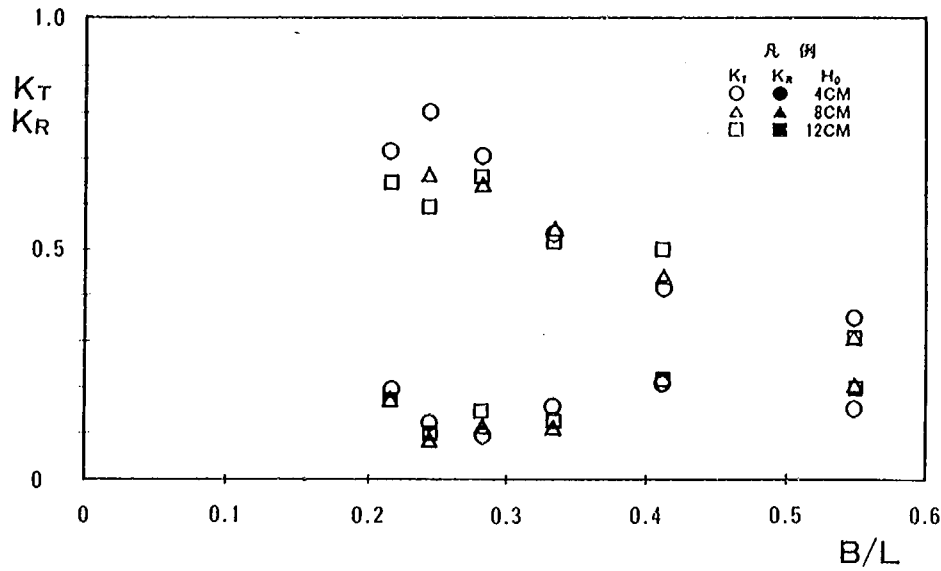


図 6.6 K_T, K_R と B/L の関係 (B タイプ, $h_2/h=0.1$)

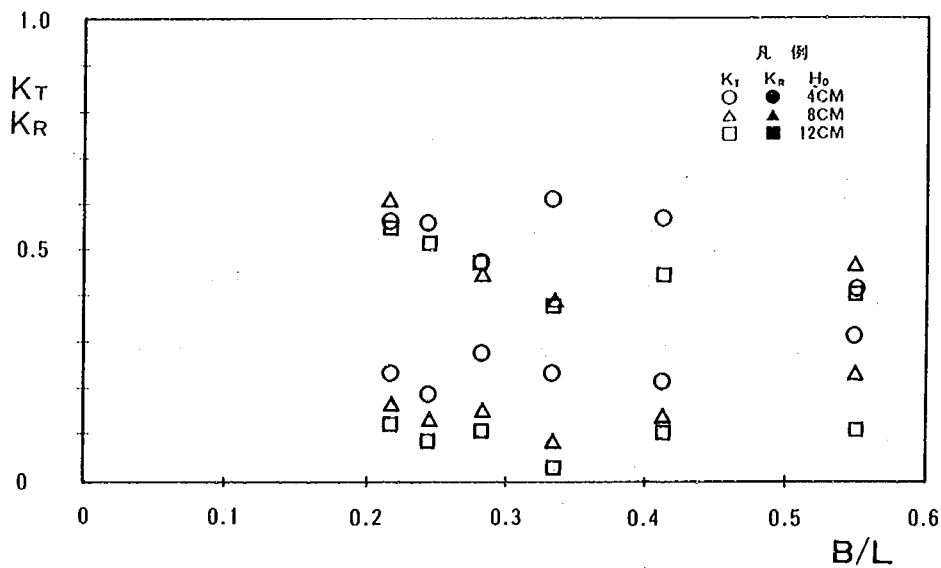


図 6.7 K_T, K_R と B/L の関係 (B タイプ, $h_2/h=0.2$)

没水深 4 cm ($h_2/h=0.1$) と 8 cm ($h_2/h=0.2$) の透過率, 反射率は $B/L \leq 0.3$ の範囲では両者とも同じような値を持ち, 没水深変化にはあまり影響されない。しかし, B タイプ模型では, 没水深 4 cm ($h_2/h=0.1$) と 8 cm ($h_2/h=0.2$) の場合, 透過率は $B/L \geq 0.3$ の範囲では没水深 4 cm ($h_2/h=0.1$) の方が, また, $B/L < 0.3$ の範囲では没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) の方が低い値を示す。この理由は, 次のように説明される。すなわち, 没水深 4 cm ($h_2/h=0.1$) の場合, B/L が大きいと入射波が水平板上で砕波することによって透過率が小さくなるのに対し, B/L が小さい場合は逆に没水深が浅いため V 型遊水部による消波効果が顕著に現れず, 透過率が大きくなる。同じ没水深 (h_2/h) に対して A, B 両タイプの比較を行うと, 没水深 4 cm ($h_2/h=0.1$) の時は A タイプ模型よ

り B タイプ模型の方がわずかに K_T が小さく、 K_R が大きい (図 6.4, 6.6)。没水深 8 cm ($h_2/h = 0.2$) では B タイプ模型の方が K_T が小さくなり、また、 K_R はそれほど大きな値とならない (図 6.5, 6.7)。このことから、開閉角 θ の大きい B タイプ模型の方が消波効果が良く、特に、没水深 8 cm ($h_2/h = 0.2$) のとき高い消波効果を持つ。次に、波形勾配の透過率、反射率へ及ぼす影響を図 6.8, 6.9 に示す。図 6.8 は A タイプ模型の没水深 4 cm ($h_2/h = 0.1$) と 8 cm ($h_2/h = 0.2$)、図 6.9 は B タイプ模型の没水深 4 cm ($h_2/h = 0.1$) と 8 cm ($h_2/h = 0.2$) の結果である。A タイプ模型、B タイプ模型共に波形勾配の増加に伴い、透過率は低くなり、反射率はやや高くなる。また、B タイプ模型の場合、透過率は没水深 8 cm ($h_2/h = 0.2$) に比較して没水深 4 cm ($h_2/h = 0.1$) の低

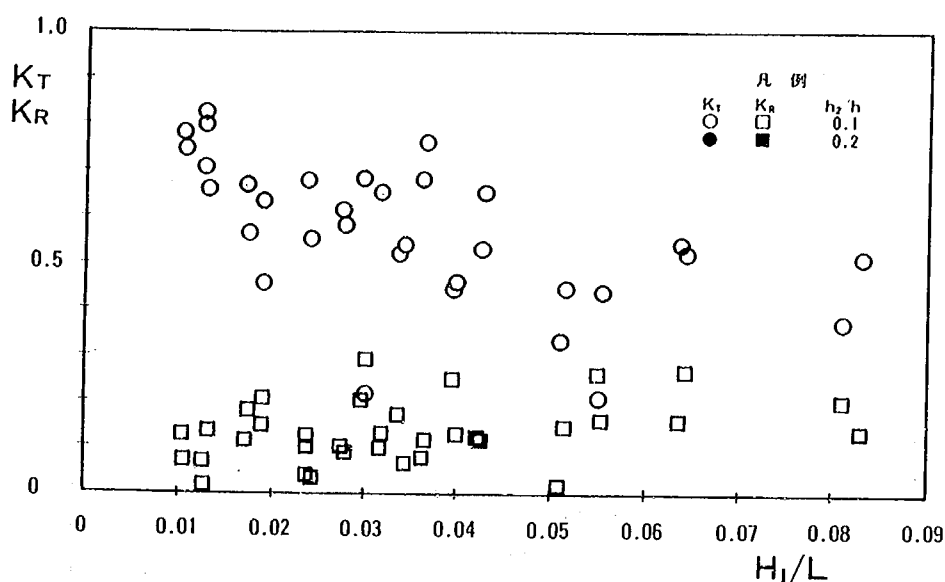


図 6.8 K_T, K_R と H_I/L の関係 (A タイプ, $h_2/h = 0.1, 0.2$)

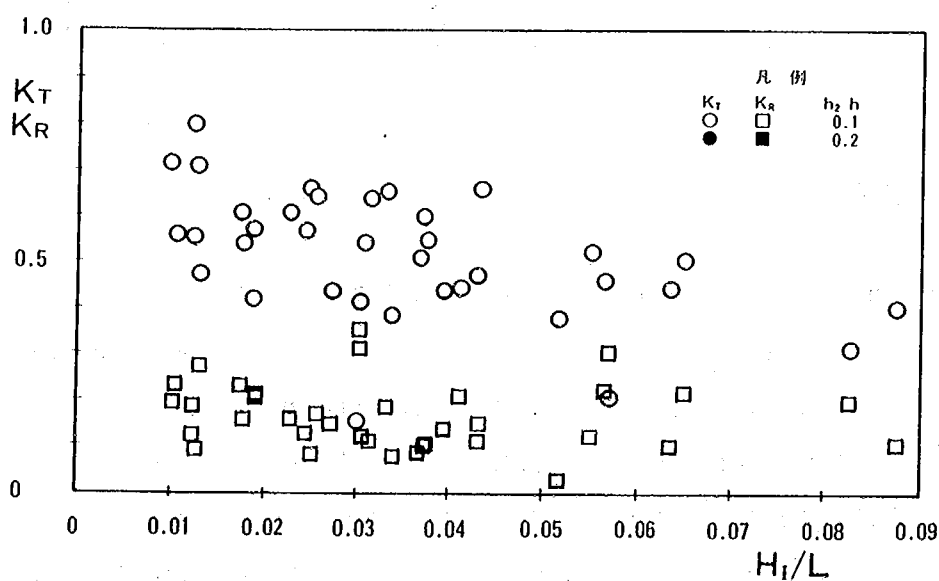


図 6.9 K_T, K_R と H_I/L の関係 (B タイプ, $h_2/h = 0.1, 0.2$)

うが若干大きな値を示している。

6.5.2 複合消波構造物のエネルギー損失率

波高のエネルギー損失率へ及ぼす影響を A タイプ模型と B タイプ模型の没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) について示すと図 6.10, 6.11 になる。ここに、エネルギー損失率 K_L^2 は次式で定義する。

$$K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad (6.1)$$

これらの 2 タイプの模型条件では、B タイプ模型の没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) が最高のエネルギー

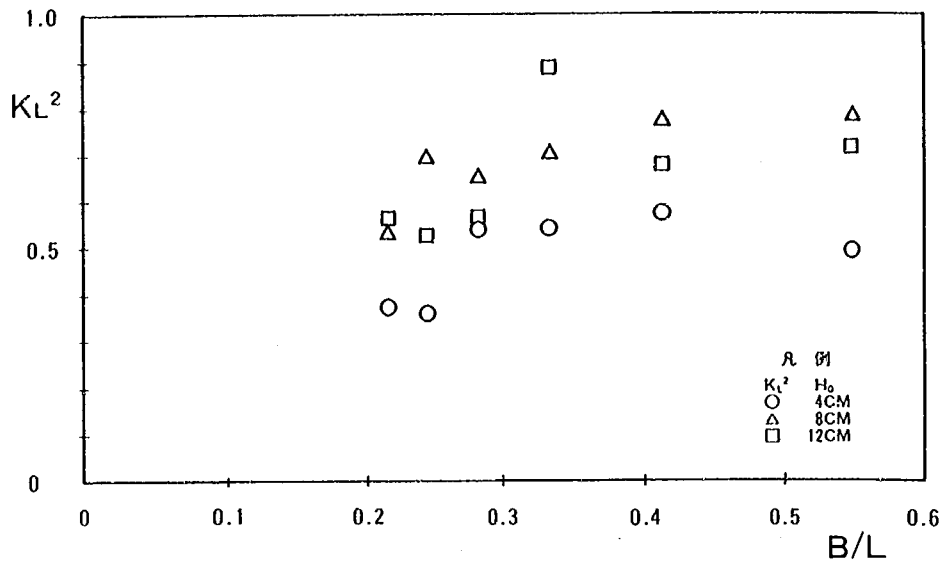


図 6.10 K_L^2 と B/L の関係 (A タイプ, $h_2/h=0.2$)

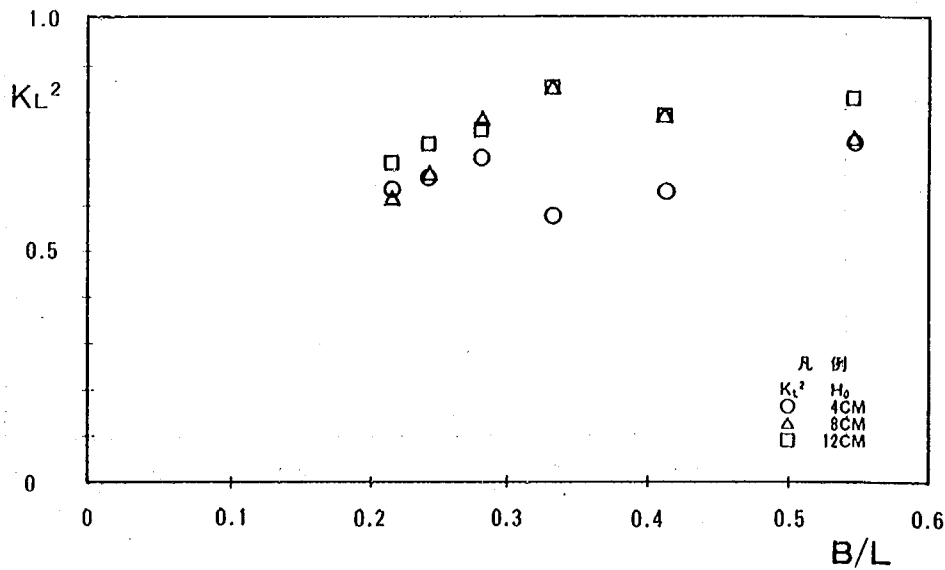


図 6.11 K_L^2 と B/L の関係 (B タイプ, $h_2/h=0.2$)

損失率を示していることから、この模型形状が最も入射波エネルギーを渦および流れのエネルギーに変換し消散させていることがわかる。また、どの模型条件においても、沖波波高 8 cm と 12 cm の場合のエネルギー損失率の値はさほど変化がなく、沖波波高 4 cm の場合のエネルギー損失率が一番低い値を示す。透過率、反射率を示した図にも現れているが（図 6.7 参照）、波高 4 cm のように入射波エネルギーの小さい場合、反射率が高くなるとともに、渦および流れに変換されるエネルギーが少なくなる。しかし、消波構造物の役割を考えると波高の低い波はさほど問題にならない。

6.5.3 複合消波構造物に作用する波力

水理実験の結果から、最も高い消波効率を示した没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) の B タイプ模型に作用する波力、モーメント及び波圧について考察を加える。

(1) 水平波力

B タイプ模型の没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) の場合の水平波力を図 6.12 に示す。この図によると、B タイプ模型の単位波高あたりの無次元水平波力は、沖波波高 4, 8, 12 cm の順で小さくなる。この理由は、高波高になるほど波の持つエネルギーが水平板、Y 型垂直板、V 型遊水部によって渦、流れおよび砕波エネルギー等に変換され消失し易くなるためと考えられる。さらに、本複合消波構造物は反射率が 0.2 程度なので、全般に作用する水平波力は小さい。また、没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) ・ 沖波波高 4 cm の場合に $B/L=0.25$ で波力が極大値を取る。その水平波力の最大値は、無次元波力 ($F_x/0.5 \rho g H_1 B^2$) で示すと 0.2 程度である。

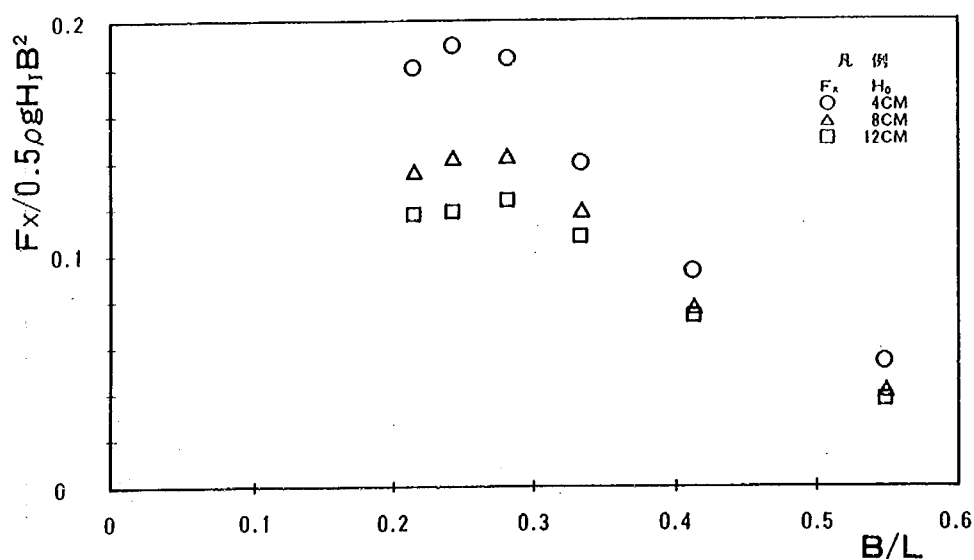


図 6.12 無次元水平波力 $F_x/0.5 \rho g H_1 B^2$ と B/L の関係 ($h_2/h=0.2$)

(2) 鉛直波力

Bタイプ模型の鉛直波力を図 6.13 に示す。Bタイプ模型の単位波高あたりの無次元鉛直波力は、短周期側では沖波波高 4, 8, 12cm の順で大きくなり、長周期側では逆に沖波波高 4, 8, 12cm の順で小さくなる。また、鉛直波力の最大値は、没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$)・沖波波高 4 cm で無次元波力 ($F_z/0.5 \rho g H_I B^2$) にして 0.4 程度である。

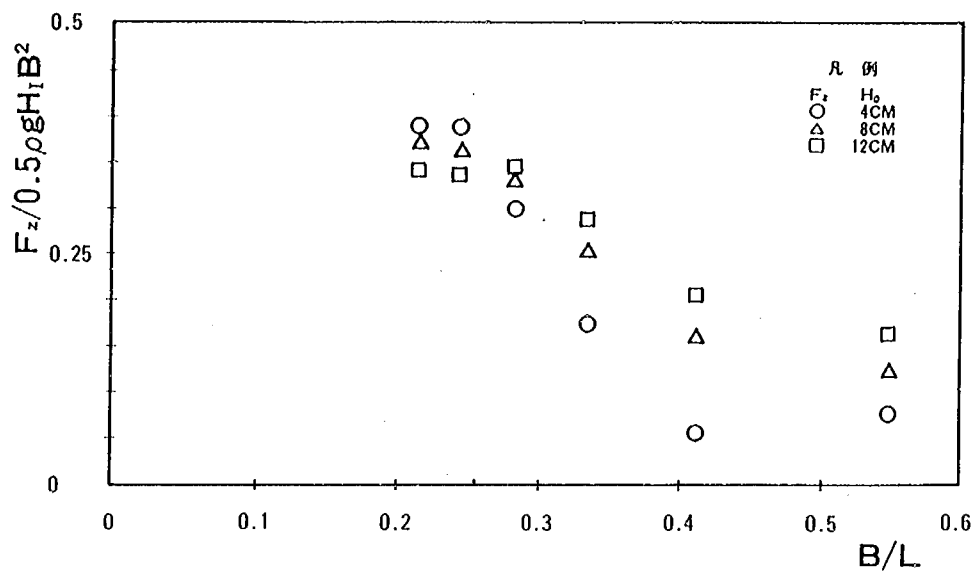


図 6.13 無次元鉛直波力 $F_z/0.5 \rho g H_I B^2$ と B/L の関係 ($h_2/h=0.2$)

(3) モーメント

Bタイプ模型のモーメントを図 6.14 に示す。Bタイプ模型の単位波高あたりの無次元モーメ

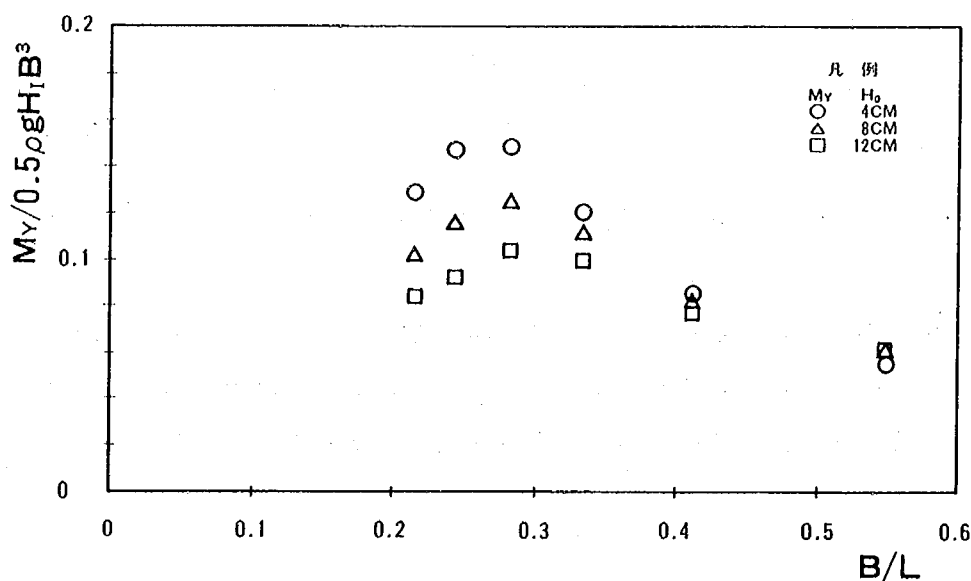


図 6.14 無次元モーメント $M_Y/0.5 \rho g H_I B^3$ と B/L の関係 ($h_2/h=0.2$)

ントは，沖波波高 4，8，12cm の順で小さくなる。この理由は水平波力の考察と同様な理由によると考えられる。また，モーメントの最大値は，没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$) で無次元モーメント ($M_Y/0.5\rho g H_1 B^3$) にして 0.15 程度である。

(4) 波 圧

複合消波構造物に作用する波圧は，模型の水平板裏側の先端部 (P_1)，中央部 (P_2)，後端部 (P_3) および Y 型垂直板後端部の下部 (P_4) に波圧計を取り付けて計測した。波圧の全実験結果を比較すると，波高変化の影響は少なかった。この理由としては，波力の考察でも示したように高波高が入射しても，その波高のエネルギーの大部分は渦および流れに変換されているためと思われる。さらに，没水深変化による影響も少なかった。したがって，波圧の実験結果は，B タイプ模型で没水深 8 cm ($h_2/h=0.2$)，沖波波高 12cm の場合についてのみ示す (図 6.15)。B タイプ模型の波圧は，先端部 (P_1)，中央部 (P_2)，後端部 (P_3) の順に大きい値を示している。また，Y 型垂直板後端部下部 (P_4) の最大波圧は，無次元波圧 ($P/0.5\rho g H_1$) にして 0.8 程度を示す。

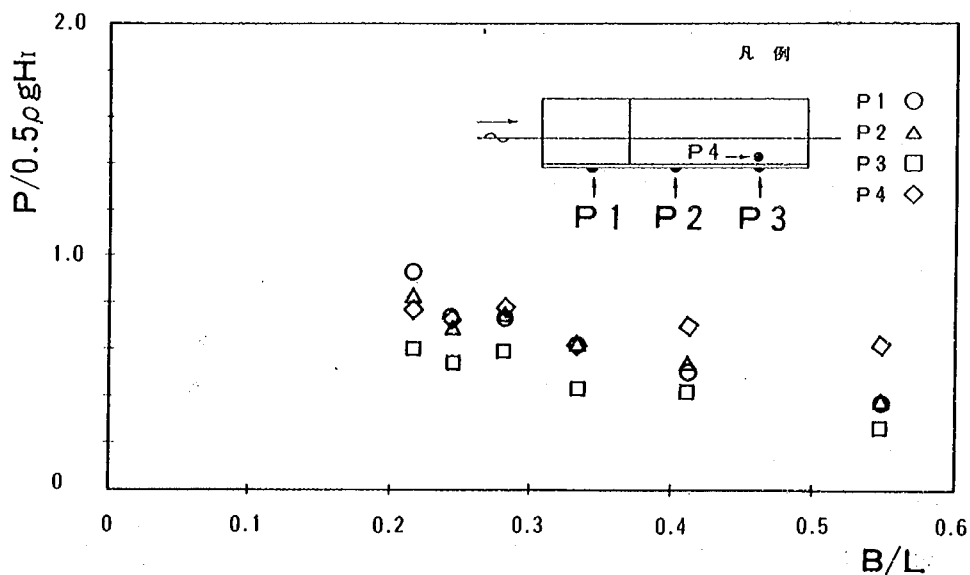


図 6.15 無次元波圧 $P/0.5\rho g H_1$ と B/L の関係 (B タイプ, $h_2/h=0.2$, $H_0=12$ cm)

以上のように，本複合消波構造物では，高波高になるほど波エネルギーが渦，流れおよび砕波エネルギー等に変換され，その結果水平波力やモーメントが相対的に小さくなることがわかった。このことは，実機を設計する際に構造的に有利な条件となるものと思われる。

6.6 結 論

複合消波構造物の水理学的特性及び力学的特性について、沖波波高変化、没水深変化による本実験を行った。この結果、以下のような結論を得た。

- ① Aタイプ模型では、没水深4 cm ($h_2/h=0.1$) と8 cm ($h_2/h=0.2$) の透過率、反射率は $B/L \leq 0.3$ の範囲では両者とも同じような値を持ち、没水深変化にはあまり影響されない。
- ② Bタイプ模型では、没水深4 cm ($h_2/h=0.1$) と8 cm ($h_2/h=0.2$) の場合、透過率は $B/L \geq 0.3$ の範囲では没水深4 cm ($h_2/h=0.1$) の方が、また、 $B/L < 0.3$ の範囲では没水深8 cm ($h_2/h=0.2$) の方が低い値を示す。
- ③ A、Bタイプ模型とも、波形勾配の増加に伴い、透過率は低くなり、反射率はやや高くなる。
- ④ Bタイプ模型の没水深8 cm ($h_2/h=0.2$) は高い消波効果と最高のエネルギー損失率を示し、入射波エネルギーの多くを渦および流れのエネルギーに変換し消散させている。
- ⑤ Bタイプ模型の単位波高あたりの無次元水平波力は、沖波波高4, 8, 12cmの順で小さくなる。
- ⑥ Bタイプ模型の単位波高あたりの無次元鉛直波力は、短周期側では沖波波高4, 8, 12cmの順で大きくなり、長周期側では逆に沖波波高4, 8, 12cmの順で小さくなる。
- ⑦ Bタイプ模型の単位波高あたりの無次元モーメントは、沖波波高4, 8, 12cmの順で小さくなる。
- ⑧ 波圧の全実験結果を比較すると、波高変化の影響は少なかった。さらに、没水深変化による影響も少なかった。
- ⑨ Bタイプ模型の波圧は、先端部 (P_1)、中央部 (P_2)、後端部 (P_3) の順に大きい値を示している。

6.7 今後の検討課題

- ① 本複合消波構造物は複合消波機能を有するため、水平板、Y型垂直板、V型遊水部の個々の構成部材の諸元を種々変化させて水理模型実験を行い、消波機能の水理学的特性を明らかにし関連するパラメータの最適化を図る必要がある。
- ② 波高分布、流速分布、海水交換等については、3次元水理模型実験によって確認する必要がある。
- ③ 周辺海域において、複合消波構造物により発生する流れによって洗掘等の問題が生じないか、また、漂砂制御効果はどのようなものか、3次元水理模型実験によって確認する必要がある。

ある。

- ④ より広い静穏海域を確保するためには、複合消波構造物をどのような配置・配列にするのが良いのかを水理模型実験によって確認する必要がある。
- ⑤ 複合消波構造物を支持する構造体を含めて、施工可能でかつ経済的な設計が可能な全体構造を検討する必要がある。
- ⑥ 複合消波構造物に作用する波力、モーメント、波圧等の力学的特性については、構造模型を用いてより詳細に検討する必要がある。
- ⑦ 本複合消波構造物を設計するための理論解析手法を開発する必要がある。

謝 辞

本研究の水理模型実験およびデータ処理・解析にあたり全面的に御協力、御指導を頂いた日本大学理工学部海洋建築工学科・増田 光一専任講師（工博）、並びに、同大・林 秀郎研究生（工博）に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部海岸研究室；海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書（1），土木研究所資料第2454号，pp. 91～105，昭和62年2月。

第7章 球面浅瀬式没水型消波構造物の 消波特性

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明

研究員 村井 禎美

東洋建設(株)土木本部技術部

倉田 克彦

土木本部技術研究所

芳田 利春

松永 博史

7.1 まえがき

本研究は，球面浅瀬式没水型消波構造物（以降球面浅瀬と略す）の反射及び透過特性を，水理模型実験によって検討し，その最も効果的な形状並びに配置を見いだそうとするものである。このため，球面浅瀬のエネルギー消散機能を水理模型実験によって推定し，その消波効果の概略の把握を行った。

7.2 構造形式概要

球面浅瀬は図 7.1 に示すように，球面体の一部が海底地盤上に突出した自然の岩礁・浅瀬に似た形状を有する没水型構造物である。その上を通過する波は，球面浅瀬上，或はその岸側のある 1 点（焦点）に向かって集中するように屈折する。この波の集中現象によって，波高は焦点近くで急激に増大した後に砕波する。その時，波はその有するエネルギーを失うため，球面浅瀬岸側では波高が減衰し，静穏な海域が創出される。このように，球面浅瀬の消波機能は波の屈折・集中による砕波現象に基づくものであるため，球面浅瀬からの反射波は小さく，周辺海域沖側へのその影響は小さいものと予想される。

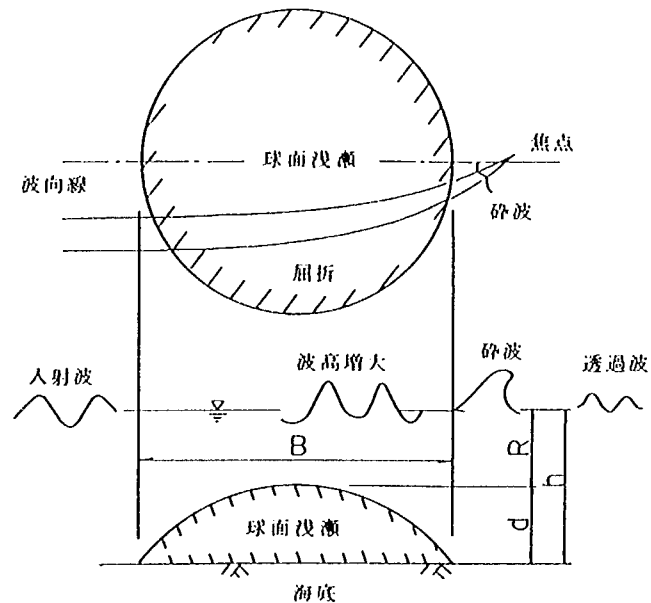


図 7.1 球面浅瀬式没水型消波構造物

球面浅瀬はその形状から明らかのように，いずれの波向きに対しても同じ程度の消波効果が期待でき，その上，景観を損ねる恐れが少ない。また，砕波によって構造物内外の海水交換の促進が期待できる。さらに，球面浅瀬は砕石・屑石などの石材を用いれば，従来の捨石堤造成技術で十分築造可能であるという利点を有している。

7.3 水理模型実験

7.3.1 実験目的

球面浅瀬の概略の消波効果を把握するため、水理模型実験によって反射率及び透過率を求め、それらの結果より球面浅瀬のエネルギー損失率の評価を行う。

有限幅の水路中に設けられる球面浅瀬は、水路側壁の鏡像効果によって無限に配置されている球面浅瀬列の中のひとつと考えられる（図 7.2 参照）。したがって、水路中の球面浅瀬の沖側および岸側は、境界（鏡面）からの反射によって、エネルギー的に無限列中の一個の球面浅瀬の周辺領域に対応することになる。このため、実験によって球面浅瀬沖側の反射波並びに岸側の透過波を測定することにより、単独の球面浅瀬におけるエネルギーの消散効果を見積ることができる。

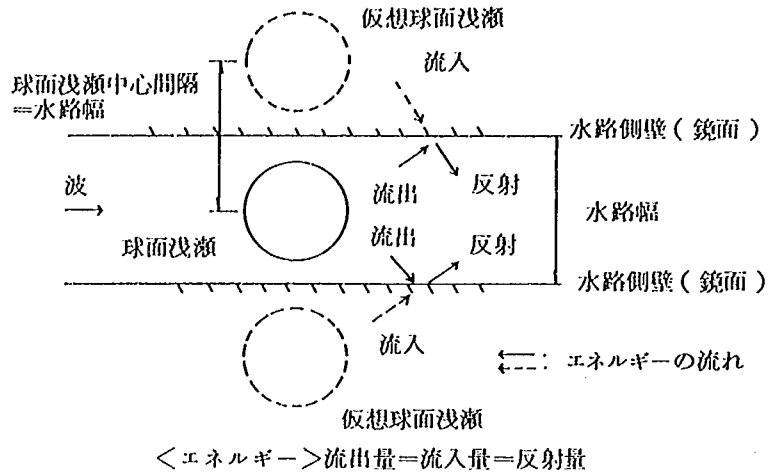


図 7.2 無限個の球面浅瀬と水路中の 1 個の球面浅瀬

7.3.2 実験方法

実験は東洋建設㈱技術研究所の不規則波造波水路を用いて行った。水路は図 7.3 に示すように全長 40 m、幅 1 m、高さ 1.6 m で、その一端には油圧式不規則波造波装置が、他端には碎石積斜面が消波装置として設けられている。水路床は造波板から 7 m までが水平、続いて 7.5 m が 1/12.5 の斜面、その後 19 m が再び水平になっている。

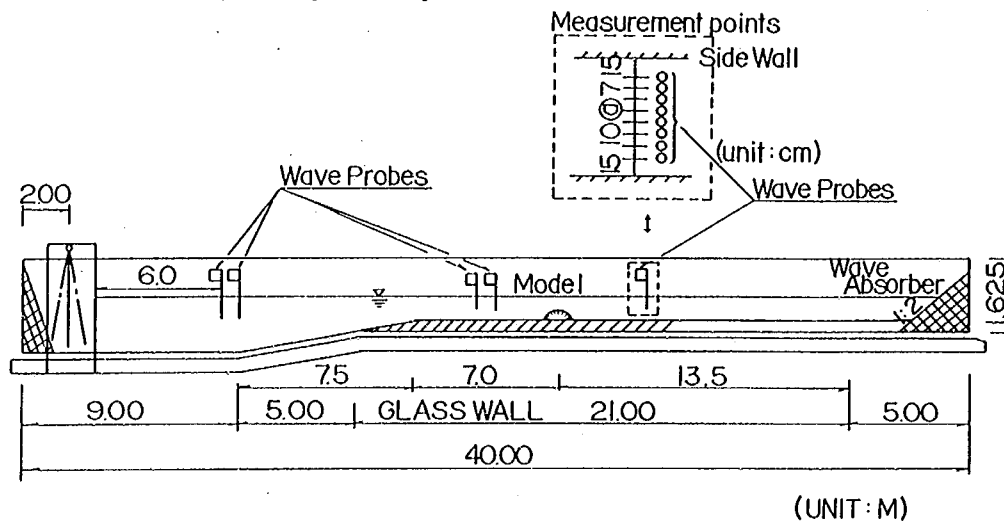


図 7.3 実験施設概略

堤体模型は碎石を用いて製作し、水平床の始まりから7 mの位置に設置した。実験で用いた波はすべて規則波である。沖波波高は造波板から6 mの位置で測定した波高から換算して求めた。透過波高の測定は球面浅瀬の岸側1.5～2波長の位置で、水路横断方向に10cm間隔、8箇所で行った。反射率は球面浅瀬の沖側1.5波長の位置で、10～40cm間隔に設置した2本の波高計の記録から入・反射波分離推定法¹⁾を用いて求めた。

7.3.3 実験条件

実験は表7.1に示す3種類の堤体模型を用い、想定縮尺を種々変えることによって、現地の値に換算した天端水深及び堤体幅などを広い範囲に変化させ、表7.2に示す現地波浪を各縮尺に応じて水路内に再現して行った。透過率の測定は全ての堤体条件について行った。反射率の測定は透過率の値が小さくなる幅 $B_m=100$ cm、高さ $d_m=9$ cmの堤体についてのみ行った。この堤体での透過率及び反射率の測定は、 $R/h=0.1$ 及び 0.2 の場合全ての波浪条件について行った。また、 $R/h=0$ および 0.3 の場合、各周期とも沖波波高 $H_0=2$ mの条件についてのみ行った。その他の堤体での透過率の測定は、全ての波浪条件について行った。

表7.1 堤体条件(水路幅; $W=100$ cm)

水 深		堤 体 幅			堤体高		天端水深		縮尺	
h_p (m)	h_m (cm)	B_p (m)	B_m (cm)	W/B_m	d_p (m)	d_m (cm)	R_p (m)	R_m (cm)	S	
10	23.3	30	70	1.4	10	23.3	0	0	1/42.9	透過率
	25.9	27			9		1	2.6	1/38.6	
	29.2	24			8		2	5.9	1/34.3	
	33.3	21			7		3	10.0	1/30	
	12.5	80	100	1.0	10	12.5	0	0	1/80	透過率
	13.8	72			9		1	1.4	1/72	
	17.9	56			7		3	5.4	1/56	
	9.0	111.1	100	1.0	10	9.0	0	0	1/111.1	透過率 反射率
	10.0	100			9		1	1.0	1/100	
	11.2	88.9			8		2	2.2	1/88.9	
	12.9	77.8			7		3	3.9	1/77.8	

添字 p : 現地換算値

添字 m : 模型値

表 7.2 波浪条件

水深: $h=10.0$ m

波浪No	周 期 T (sec)	沖 波		入 射 波	
		波 高 H_0 (m)	波 長 L_0 (m)	波 高 H_I (m)	波 長 L (m)
1	6.0	1.0	56.3	0.92	48.5
2		2.0		1.83	
3	7.0	2.0	76.5	1.84	59.8
4		4.0		3.67	
5	8.0	3.0	99.8	2.80	70.8
6		4.0		3.73	
7	10.0	1.0	156.0	0.99	92.3
8		2.0		1.97	
9		3.0		2.95	
10	14.0	2.0	305.8	2.21	133.8
11		3.0		3.32	

7.3.4 実験結果とその考察

(i) 透過率

球面浅瀬岸側の波高は、入射波の進行方向と直角な断面（水路横断方向）内における測定位置によってかなり値が異なるので、各断面内の8点で測定した波高 H_T と入射波高 H_I の比 $\tilde{K}_T = H_T/H_I$ の平均値を平均透過率 $\overline{K}_T$ と称する。平均透過率 $\overline{K}_T$ の水路縦断方向の分布を、堤体幅と堤体高の比 $B/d = 8$ なる堤体条件で $R/h=0.1$ の場合について求めた結果が図 7.4 である。この図の縦軸は $\overline{K}_T$ 、横軸は堤体岸側端部から測定断面までの距離 X と波長 L との比 X/L である。図に示すように、 $B/L=1$ を境にして $\overline{K}_T$ の値がかなり異なっている。これは、 $B/L>1$ では巻き波状態、 $B/L=0.538$ では崩れ波に近い状態であり、この砕波状況の違いによるエネルギー損失の差によるものと思われる。実験の範囲内では B/L 、 H_0/h の値がいずれの場合も、球面浅瀬のすぐ岸側を除いて $\overline{K}_T$ は X/L の増加とともに減少傾向を持つが、 X/L がほぼ2となると減少割合は小さくなる。 $\overline{K}_T$ は B/L の値に応じてある値に漸近するようである。これは、次のように考えられる。球面浅瀬すぐ岸側では屈折によって波高が大きくなる。その後生じる砕波ならびにそれに伴う乱れにより、波はエネルギーの一部を消散し、新たな波が再生し拡がりながら岸側に伝播する。この波の拡がりには水路側壁によって抑制・反射されるため、入射波の進行方向と直角な断面内のエネルギーの総量が、ある程度波が進行することにより、水路延長方向にほぼ一様なエネルギー量を示すようになると考えられる。

このため、球面浅瀬の透過率 K_T は、 $\overline{K}_T$ の値が B/L に応じてある値に漸近するようになる $X/L=1.5\sim 2$ の位置で測定した K_T を用いる。

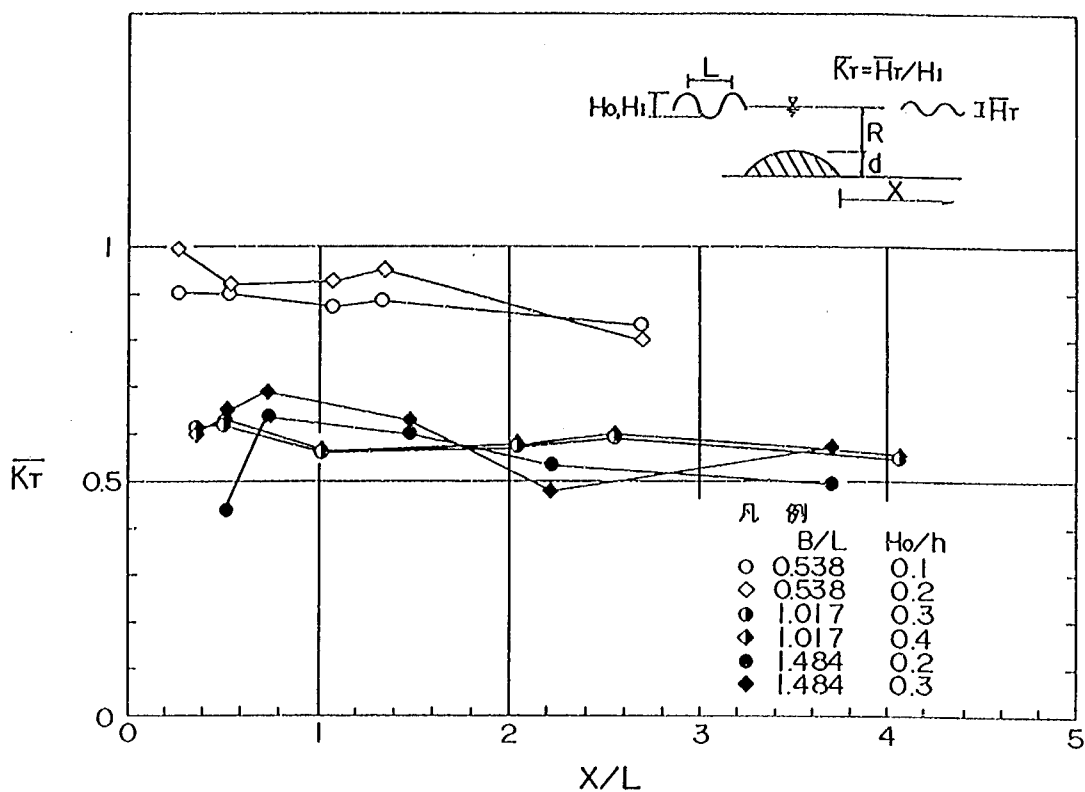


図 7. 4 平均透過率 $\overline{K_T}$ の水路縦断方向の分布

なお、このように定めた K_T ならびに $\overline{K_T}$ と、波の有するエネルギーに着目して以下のように定義する透過率 K_{TE} および $\overline{K_{TE}}$ の違いは、実験の範囲内で 5 % 程度である。従って、球面浅瀬の透過率を K_T によって表して問題ないことがわかる。

$$\overline{K_{TE}^2} = \text{水路横断方向の } (\widetilde{K_{TE}})^2 \text{ の平均値}$$

$$K_{TE}^2 = \text{水路縦断方向の } (\overline{K_{TE}})^2 \text{ の平均値}$$

天端水深比 R/h が 0.1 と 0.2 の場合について、 K_T の B/L による変化を図 7. 5 及び 7. 6 に示す。

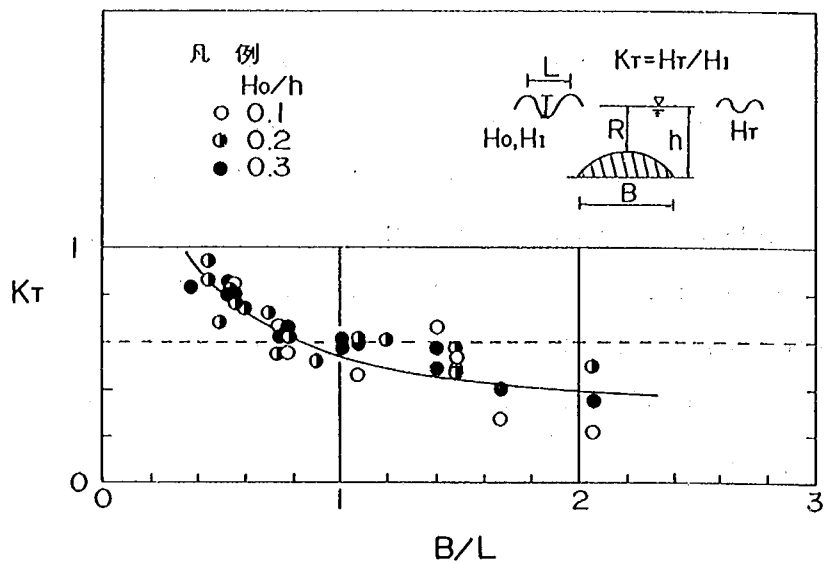


図 7. 5 透過率 K_T と B/L の関係 ($R/h = 0.1$ の場合)

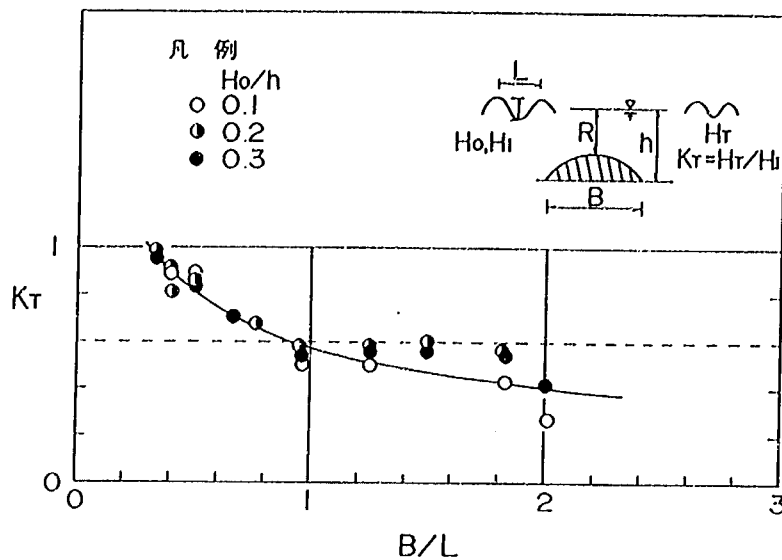


図 7. 6 透過率 K_T と B/L の関係 ($R/h=0.2$ の場合)

図中の実線は実験値に最もよく適合するように描いた曲線である。これらの図より明らかなように、 $B/L=0.5\sim 2.1$ の範囲では、 B/L の値の増加に従って K_T は 1 から 0.4 までほぼ単調に減少する。また、この波浪条件では、 K_T の値に対する H_0/h の影響、つまり入射波高の影響は小さい。このことは、球面浅瀬上での屈折・集中によって波が砕ける場合、入射波の全エネルギーに対する損失エネルギーの割合が、入射波高の大小にかかわらずほぼ同じになることを示唆している。

波高を $H_0/h=0.2$ と一定に保ち、 R/h を 0 より 0.3 の間で変化させた場合の透過率 K_T と B/L の関係を図 7. 7 に示す。図中の実線は R/h ごとの実験値に適合するように描いた曲線である。 $B/L=0.5\sim 2.2$ の範囲において、 B/L の増加に従って K_T は単調に減少するが、 R/h が小さいほど透過率は小さい。これは、天端水深が小さいほど、また堤体幅が大きくなるほど砕波が起りやすくなり、損失エネルギーの割合が大きくなるためと考えられる。

海域制御構造物としては、 $K_T < 0.6$ であることが必要とされており、 $R/h=0\sim 0.2$ の範囲では、 $K_T=0.6$ となる B/L の値は 0.6 より 1.1 まで R/h の増加とともに緩やかに増大する。一方、 $R/h=0.3$ では、 $B/L \approx 2.3$ になっても $K_T < 0.6$ とならない。したがって、球面浅瀬は少なくとも $R/h \leq 0.2$ 、 $B/L > 1.1$ にする必要がある。図 7. 7 は $H_0/h=0.2$ の場合についてであるが、前述のように K_T におよぼす H_0/h の影響が小さいことから、他の波高条件についてもほぼ同じ様な結果が得られると思われる。

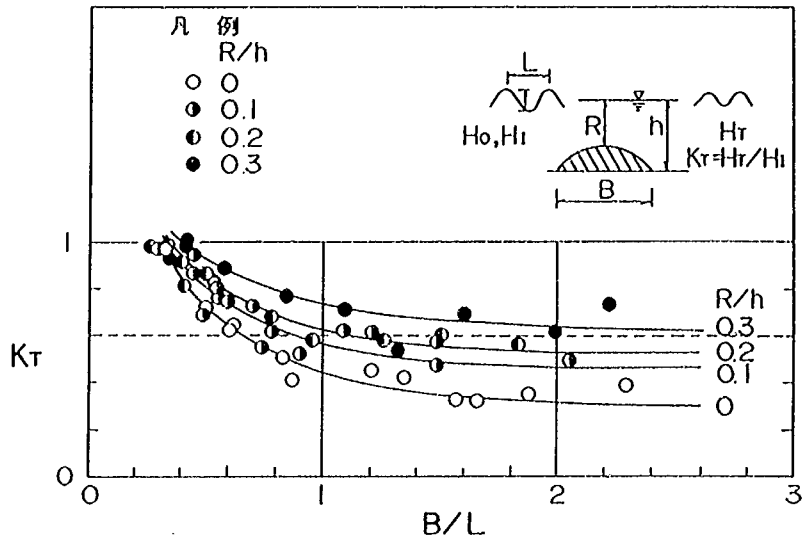


図 7.7 透過率 K_T と B/L の関係 ($H_0/h=0.2$, $R/h=0\sim0.3$ の場合)

(2) 反射率

球面浅瀬沖側における反射波高 H_R の水路横断方向の分布は、ほぼ一様であったので、水路中央ならびにその両側に25cmずつ離れた3点での $\bar{K}_R = H_R/H_i$ の値の平均値をこの断面における平均反射率 $\bar{K}_R$ とする。水路縦断方向（波の進行方向）の K_R の分布の例を図 7.8 に示す。図の縦軸は $\bar{K}_R$ 、横軸は球面浅瀬の沖側端部からの沖向き距離の比 X/L である。 $\bar{K}_R$ の値は周期、波高によって若干異なるが、図 7.8 に示すように小さく、ほとんどの場合 $\bar{K}_R < 0.1$ であり、球面浅瀬からの距離による変化はほとんどない。したがって、以下の反射率の議論においては、球面浅瀬の反射率 K_R は浅瀬の沖側端部から1.5及び2 m の2点での $\bar{K}_R$ の平均値を用いた。

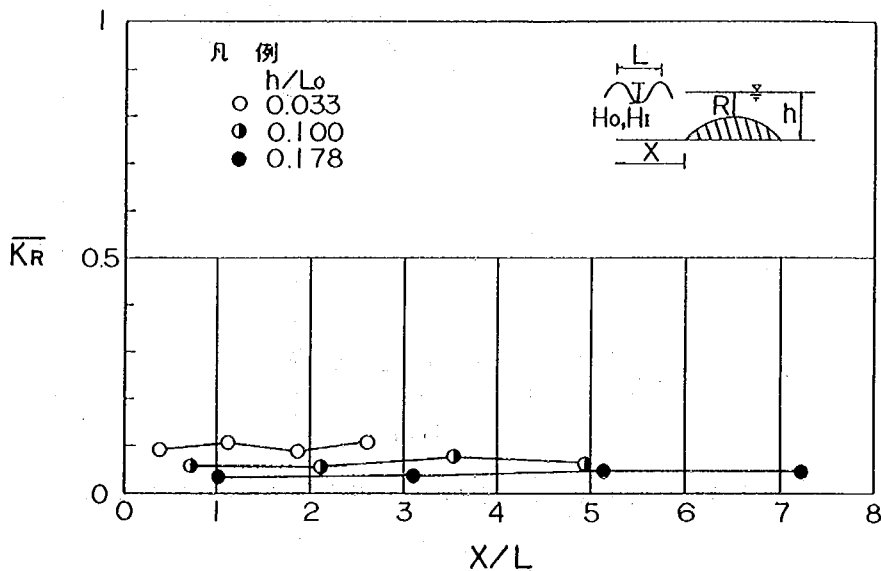


図 7.8 平均反射率 $\bar{K}_R$ の水路縦断方向の分布

$R/h=0.1$ と 0.2 の場合、 K_R の B/L による変化を H_0/h をパラメータとして表すと、図7.9及び7.10となる。また、 $H_0/h=0.2$ の場合、 K_R の B/L による変化を R/h をパラメータとして表したものが図7.11である。これらの図より明らかなように、 K_R の値は B/L 、 R/h 、 H_0/h 等の違いにかかわらず、ほとんどの場合0.1以下であり、大きくても0.2以下である。また、それらの条件の違いによる K_R の値の違いは小さい。したがって、球面浅瀬は海域制御構造物として要求される機能； $K_R < 0.5$ を十分満足するものと言える。

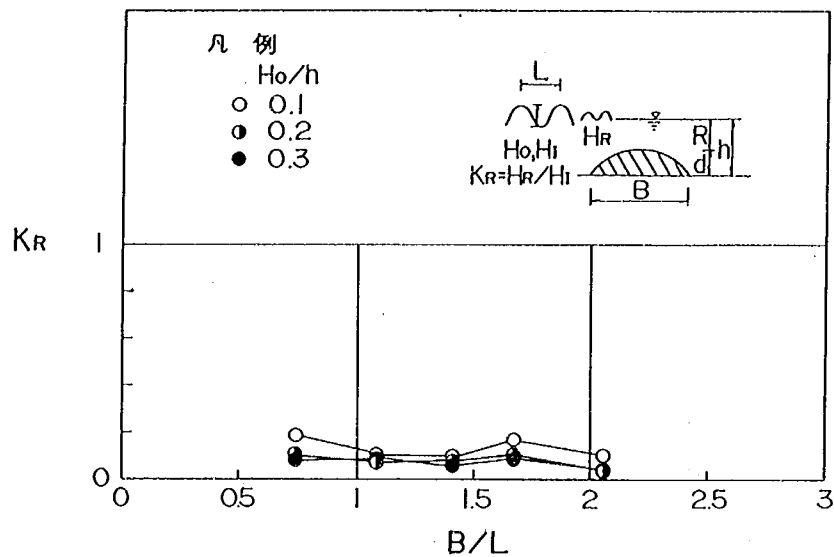


図7.9 反射率 K_R と B/L の関係 ($R/h = 0.1$ の場合)

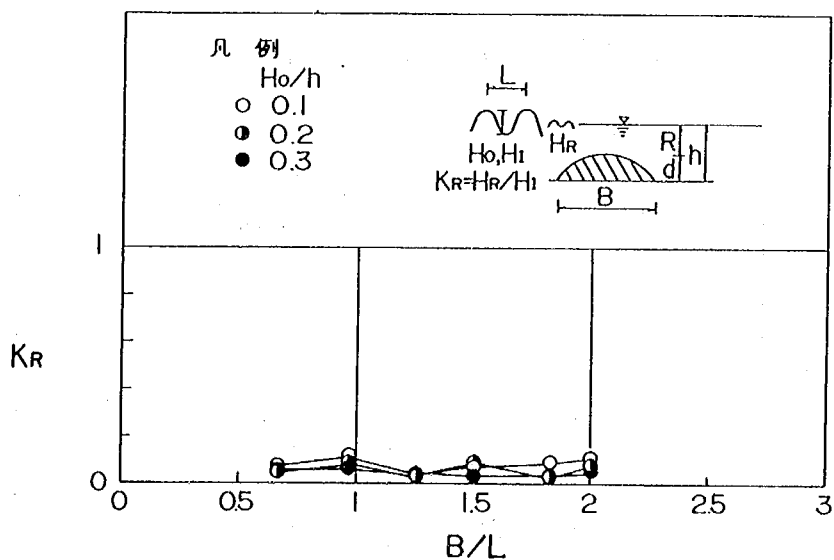


図7.10 反射率 K_R と B/L の関係 ($R/h = 0.2$ の場合)

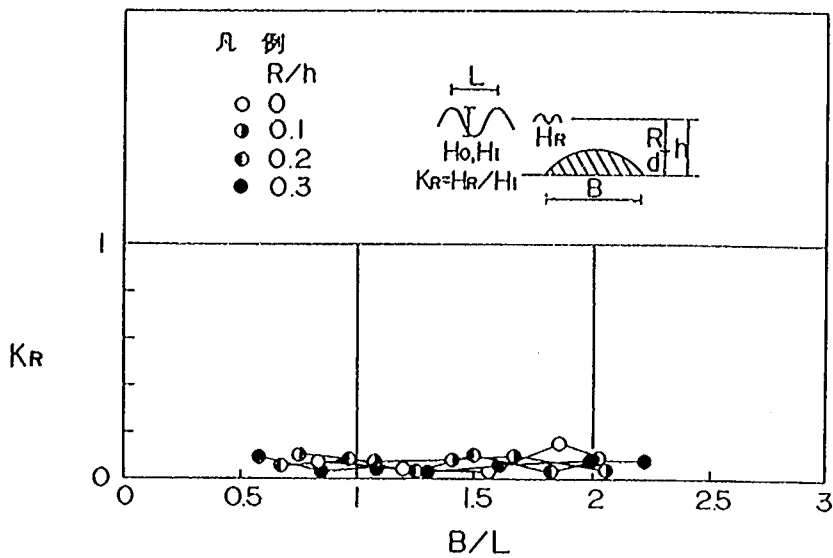


図 7.11 反射率 K_R と B/L の関係 ($H_0/h=0.2$, $R/h=0\sim0.3$ の場合)

(3) エネルギー損失率について

透過率 K_T と反射率 K_R を用いれば、エネルギー損失率 K_L^2 が次のように表される。

$$K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (7.1)$$

$H_0/h=0.2$ の場合、 K_L^2 の B/L による変化を R/h をパラメータとして表すと図 7.12 となる。図に示すように、 B/L の増加と共に K_L^2 は変動しながら大きくなり、 $B/L > 1.5$ では変動しながらもほぼ一定な値に近づくようである。これは、 B/L が大きいほど球面浅瀬上で失われるエネルギーは大きくなるが、 $B/L > 1.5$ となれば堤体幅の影響があまり大きくないことを示している。また、天端水深が小さい $R/h \leq 0.2$ では K_L^2 は $0.65 \sim 0.85$ とかなり大きなエネルギー損失

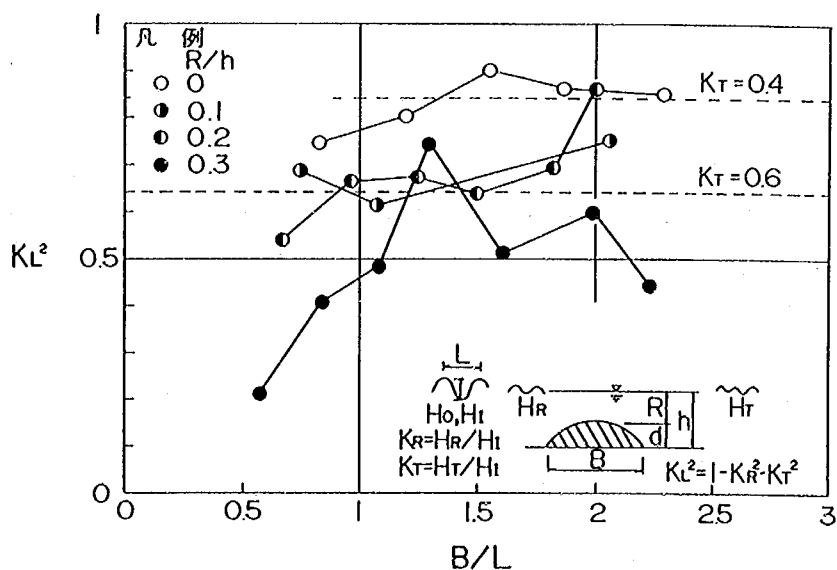


図 7.12 エネルギー損失率 K_L^2 と B/L の関係 ($H_0/h=0.2$, $R/h=0\sim0.3$ の場合)

を示すが、 $R/h=0.3$ では K_{L^2} は $0.4\sim 0.6$ と小さくなる。以上の結果からも、球面浅瀬は $R/h \leq 0.2$ および $B/L > 1.1$ の条件を満足することが必要と考えられる。

7.4 まとめ

球面浅瀬についての水理模型実験の結果より、以下のようなことが分かった。

- ① 堤体幅 B と波長 L の比 B/L の増加に伴って消波効果は高くなる。
- ② 天端水深 R が小さくなると消波効果は高くなる。
- ③ 海域制御構造物として必要とされる透過率 $K_T < 0.6$ を満足する球面浅瀬は、 $R/h \leq 0.2$ 、 $B/L > 1.1$ であることが必要であり、この時、反射率は 0.2 以下であり所要の機能 $K_R < 0.5$ を十分満足する。

7.5 今後の検討課題

今後、以下のような課題についての検討が必要である。

- ① 平面模型実験による球面浅瀬式没水型構造物（単体）の水理特性の正確な把握
- ② 構造物の配置状況の違いによる水理（消波）特性ならびに経済性についての検討
- ③ 海水交換・漂砂制御の効果についての検討
- ④ 球面浅瀬周辺での波浪状況を的確に把握するための数値モデルの開発

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料 No 248，24p.，1976.

第 8 章 根入れ式鋼板セルを用いた海域 制御構造物に関する実験的研究

土木研究所海岸研究室	室 長	宇多	高明
	研究員	村井	禎美
住友金属工業(株)鉄 構 技 術 部		中山	種清
開 発 推 進 室		飯村	修
建設工学研究室		喜田	浩
開 発 推 進 室		柳本	泰伴
設 計 技 術 室		北村	卓也
東亜建設工業(株)技 術 開 発 部		荻野	秀雄
水 理 研 究 室		堺	和彦
設 計 部		水野	敏雄

8.1 実験目的

本実験は、根入れ式鋼板セルを用いた海域制御構造物を開発することを目的とし、各種モデルの消波効果および作用波力等を明らかにするものである。根入れ式鋼板セル海域制御構造物の概念図を図 8.1 に示す。

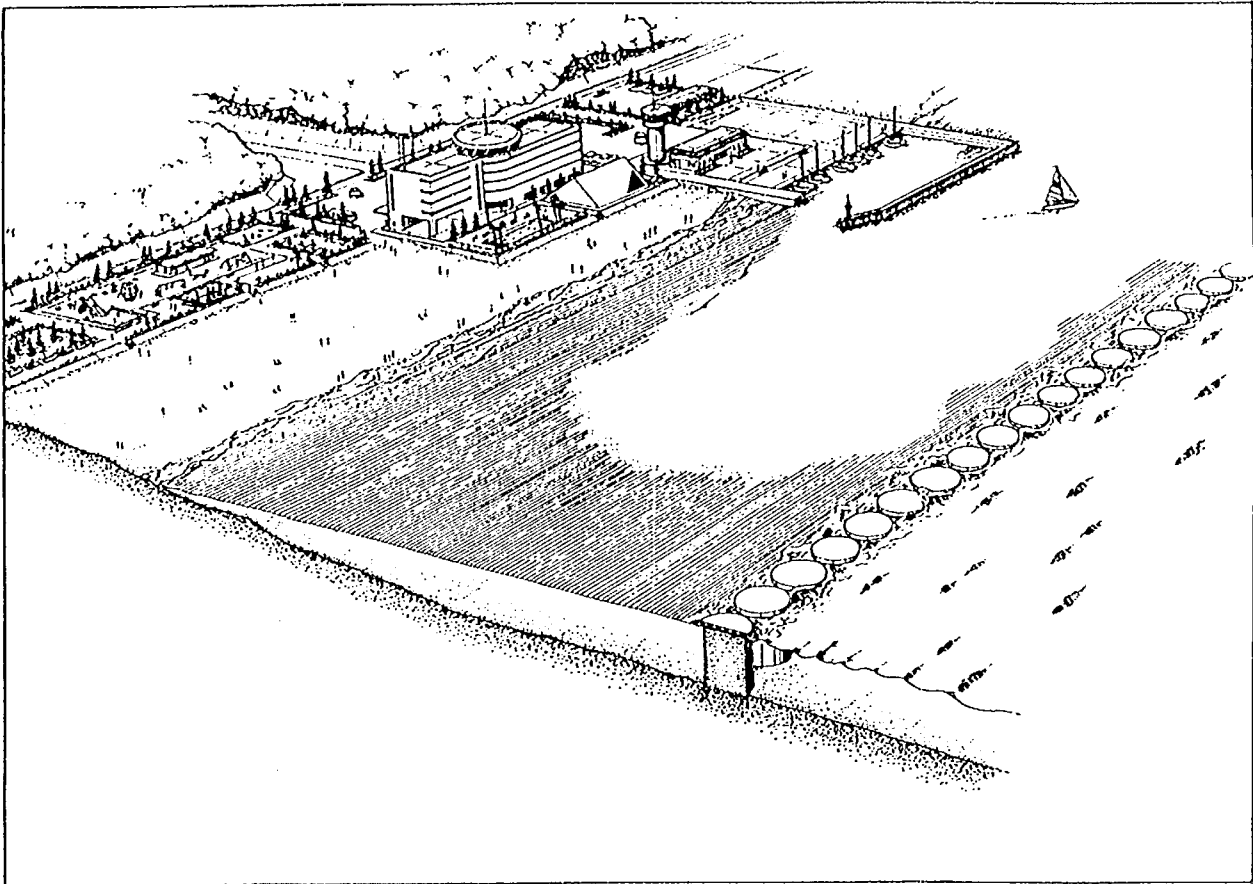


図 8.1 根入れ式鋼板セル海域制御構造物の概念図

8.2 実験概要

実験は、セル体を断続的に配置した透過型のセル式海域制御構造物を対象とし、構造物の透過率・反射率および構造物に作用する波力、波のうちあげ高さを測定した。実験モデルは、単純な円筒形のセル体を適当な間隔で 1 列に配置したものを基本として、セル体の形状を基本タイプ、越波タイプ、遊水タイプ、フラップタイプの 4 通りに変化させ、セル体の配置形式を 1 列、2 列、千鳥配置の 3 通りに変化させた。

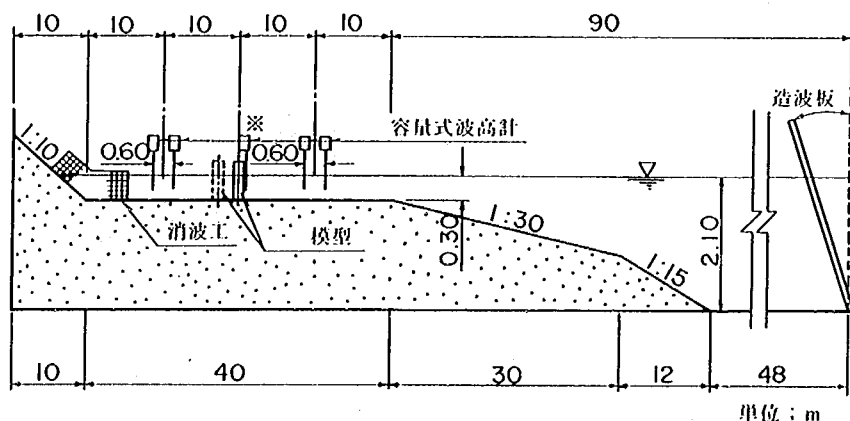
実験は、二次元水路において予備実験を行い、各種モデルの定性的な消波特性を把握した後、優良な消波効果が得られるモデルに関して、さらに改良を加え、より実海域に近い条件となる平

面水槽において本実験を実施した。なお、実験で扱った構造は円筒形のセル体を断続的に配置したものであるため、構造物によって生じる波は平面的な広がりを持つ三次元的な波となる。従って、二次元水路実験には不向きな部分があるが、予備実験では出来るだけ多くの構造物に関してその消波効果を明らかにすることを主目的としたため、実験が比較的簡便な二次元水路を使用した。

8.3 予備実験

8.3.1 実験方法

実験は、建設省土木研究所の漂砂実験水路において行った。水路は全長 140 m，幅 2 m，高さ 5 m であり，造波装置は固定フラップ式である。水路には図 8.2 に示す仮設床を設け，造波板から 48 m の区間を水平床とし，そこから 12 m を勾配 1/15 の斜面，その先 30 m を勾配 1/30 の斜面とし，さらにこれより先 40 m を水平床とした。また，水平床より先，水路端までの 10 m は勾配 1/10 の一様斜面として，ステラシートによる消波工を設置した。計測は，図 8.2，8.3 に示すように，容量式波高計を 5 台，波圧計を 12 台用いて行った。実験の縮尺は 1/50 とし，現地と模型のスケール



※模型前面の波高計は模型より 1 cm 離れた位置に設置した

図 8.2 海浜断面形状と計測器配置図（波高測定）

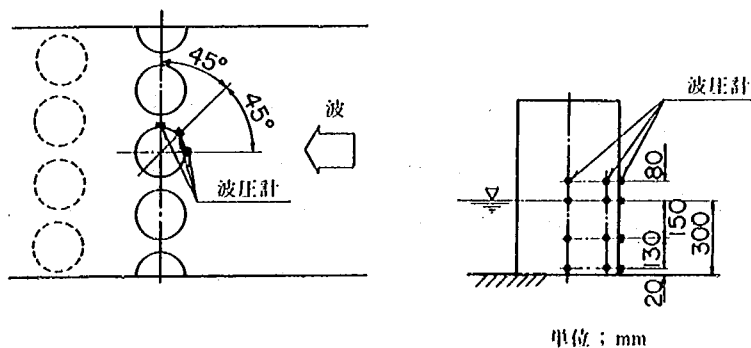


図 8.3 計測器配置図（波圧測定）

は表 8.1 の通りとした。また、実験は規則波を用いて行い、波浪条件は表 8.2 の通りとした。

表 8.1 実験スケール

	実 物	モデル (縮尺 1/50)
セル直径 (m)	18.5	0.37
水 深 (m)	15.0	0.30

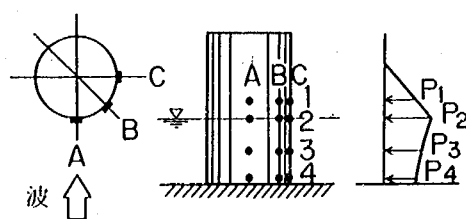
表 8.2 波浪条件一覧

波高 \ 周期	8.5 sec (1.2 sec)	10 sec (1.4 sec)	12 sec (1.7 sec)	14 sec (2.0 sec)	16 sec (2.3 sec)
2.0 m (4cm)	○	○	○	○	—
4.0 m (8cm)	○	○	○	○	—
6.0 m (12cm)	—	○	○	○	○

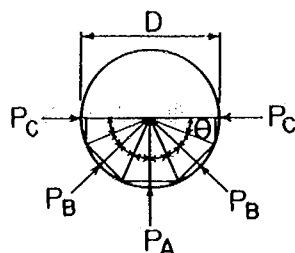
※ () 外 ; 実スケール, () 内 ; 実験モデル

入・反射波および透過波は各々 2 台の波高計によって測定し、入射波基本周期 10 波分のデータを用いて解析を行った。入・反射波高 H_I , H_R は合田ほかの方法¹⁾を用いて分離推定し、透過波高 H_T は 2 台の波高計について得られた値の平均値を用いた。透過率 K_T および反射率 K_R は、このようにして得られた H_I , H_T , H_R より $K_T = H_T/H_I$, $K_R = H_R/H_I$ として算定した。また、波力および波力によるモーメントは以下の方法により算定した。

- 波力分布；鉛直方向 4 箇所に取り付けた波圧計によって得られた波圧 p_1 , p_2 , p_3 , p_4 を直線で結び近似する。



- 波力 P ；波圧計 A 列, B 列, C 列毎の単位幅当たりの波力 P_A , P_B , P_C の入射方向成分を次式によって足し合わせる。



$$\theta = \pi/8$$

D ; セル直径

$$\begin{aligned}
P &= \text{波圧計 A 列の単位幅当たり波力の入射方向成分} \times \text{波圧計 A 列の分担幅} \\
&+ \text{波圧計 B 列の単位幅当たり波力の入射方向成分} \times \text{波圧計 B 列の分担幅} \times 2 \\
&+ \text{波圧計 C 列の単位幅当たり波力の入射方向成分} \times \text{波圧計 C 列の分担幅} \times 2 \\
&= P_A \times (2 \times D/2 \times \sin \theta) + \{ P_B \times \cos(\pi/4) \} \times (2 \times D/2 \times \sin \theta) \times 2 \\
&\quad + \{ P_C \times \cos(\pi/2) \} \times (D/2 \times \sin \theta) \times 2 \\
&= P_A \times D \times \sin(\pi/8) + \sqrt{2} \times P_B \times D \times \sin(\pi/8) \quad (8.1)
\end{aligned}$$

• 波力によるモーメント M ;

波力算定方法と同様に次式により算定する。

$$M = M_A \times D \times \sin(\pi/8) + \sqrt{2} \times M_B \times D \times \sin(\pi/8) \quad (8.2)$$

ここに, M_A ; 波圧計 A 列の波力による単位幅当たりのモーメント

M_B ; 波圧計 B 列の波力による単位幅当たりのモーメント

ただし, モーメントの中心は模型下端(水路底)とする。

• 最大波力および波力による最大モーメント ;

入射波基本周期10波分のデータに関し, 各波毎の最大値を求め, その平均値を用いる。各波毎の最大値としては, 入射方向正面の静水面位置における波圧が最大となった時の値を用いる。

8.3.2 構造条件

海域制御構造物の構造様式は, 個々のセル体を適当な間隔で配置したものであるが, セル体の形状は基本タイプ, 越波タイプ, 遊水タイプの3通りとし, 配置間隔等を変化させて計14タイプの構造につき実験を行った。

構造条件一覧を表 8.3 に示す。また, 配置形式およびセル体の形状は図 8.4 ~ 8.5 の通りであり, 円筒体を断続的に配置しただけの構造を基本タイプとし, 他のタイプの消波効果を評価する上での指標とした。

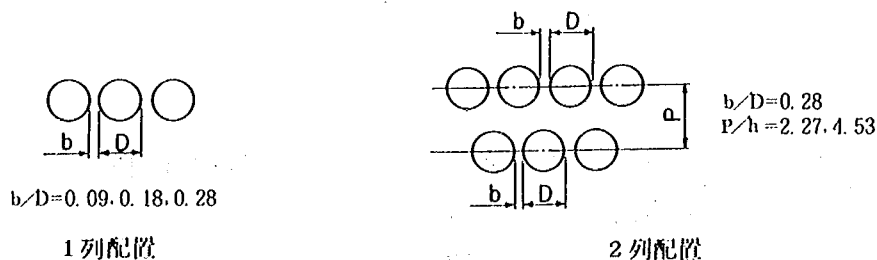


図8.4 配置形式一覧

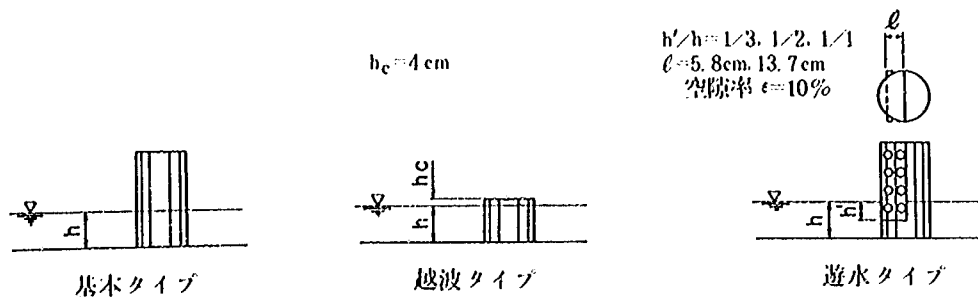
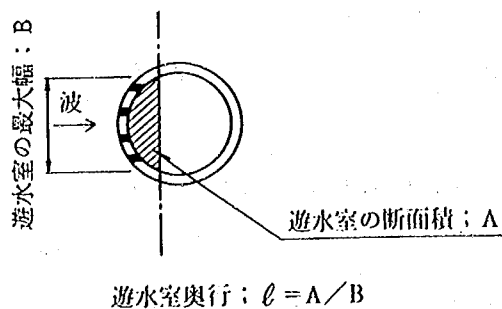


図8.5 セル形状一覧

表8.3 構造条件一覧

構造形式	配置形式	配置間隔		遊水部諸元
		セル間隙比	2列のセル間の中心距離と水深の比	
基本タイプ	1列配置	$b/D = 0.09$		
		$b/D = 0.18$		
		$b/D = 0.28$		
	2列配置	$b/D = 0.28$	$P/h = 2.27$	
		$b/D = 0.28$	$P/h = 4.53$	
越波タイプ	1列配置	$b/D = 0.09$		
		$b/D = 0.28$		
	2列配置	$b/D = 0.28$	$P/h = 2.27$	
		$b/D = 0.28$	$P/h = 4.53$	
遊水タイプ	1列配置	$b/D = 0.09$		$h'/h = 1/2, l = 5.8 \text{ cm}$
				$h'/h = 1/3, l = 13.7 \text{ cm}$
		$b/D = 0.28$		$h'/h = 1/2, l = 13.7 \text{ cm}$
				$h'/h = 1/1, l = 13.7 \text{ cm}$
	2列配置	$b/D = 0.28$	$P/h = 2.27$	$h'/h = 1/2, l = 13.7 \text{ cm}$

※……遊水室の換算奥行； l は，遊水室の断面積を遊水室の最大幅で割った値とした。



8.3.3 実験結果

(1) 反射率および透過率

- セル間隙比 b/D に関しては、 b/D が大きくなるほど反射率は減少し、透過率は増加する。その影響は反射率より透過率において顕著に現れる。
- 1列配置型構造の場合、反射率は H/L が大きくなるほど減少するが、透過率は H/L にあまり依存しない。
- 越波することにより、反射率は減少するが、同時に透過率が增加する。そこで、エネルギー損失率を基本タイプと比較した場合、有意な差は認められない。従って、越波による消波効果を期待するためには、セル天端形状の工夫等が必要である。
- 遊水室を設けることによると、空隙率を0.1とした今回の実験では、反射率は基本タイプに比べ10%~20%程度低減される。
- 2列配置における反射率および透過率は、2列のセル間の中心距離 P と入射波長 L との比によって著しく変化し、反射率は $P/L=1/4, 3/4$ 付近で最小となり、透過率は $P/L=1/2$ 付近で最小となる。 P/L をパラメータとした時、反射率と透過率の関係は、一方の値が最小となる条件で他方の値がほぼ最大となり、1列配置型の構造に比べ消波効果が高いとは言えず、実用上あまり有用な構造ではないと判断される。

(2) 波 圧

基本タイプ1列配置モデルの波圧特性を図8.6~8.8に示す。これらの図においては合田式との比較を行っており、図8.6は代表的なケースの波圧分布を示し、図8.7, 8.8は堤体に働く最大水平波力および波力による最大モーメントを示す。図8.6より、波圧の分布形状は合田式とかなり良く一致していることが分かる。A列~C列の波圧を比較すると、入射方向正面のA列における波圧が最も大きくなり、入射方向と45°をなすB列における波圧は、A列の波圧に比べ若干小さめの値を示す。入射方向と直角のC列における波圧は、模型間のかなり狭い間隙を波が通過して行くにもかかわらず、A, B列の波圧に比べかなり小さくほぼ1/2程度である。

次に、図8.7, 8.8より、最大水平波力および最大モーメントは合田式で求めた値より小さくなり、合田式との比率で評価すると反射率と同様な傾向を示し、セル間隙が広く波形勾配が大きいケースほど小さな値となることが分かる。これは、模型に作用

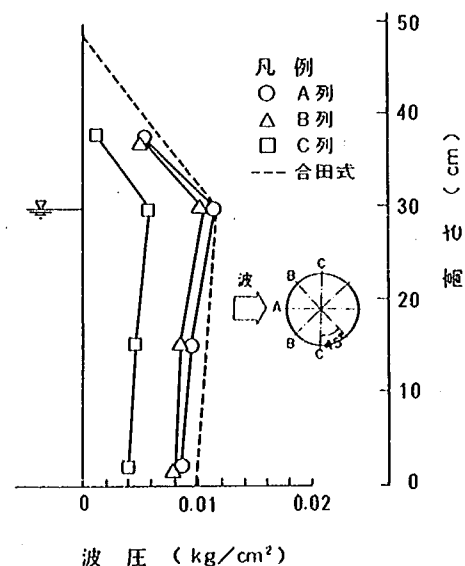


図8.6 波 圧 分 布
(基本タイプ1列配置; $b/D=0.18$,
 $H=12.5$ cm, $T=1.97$ s)

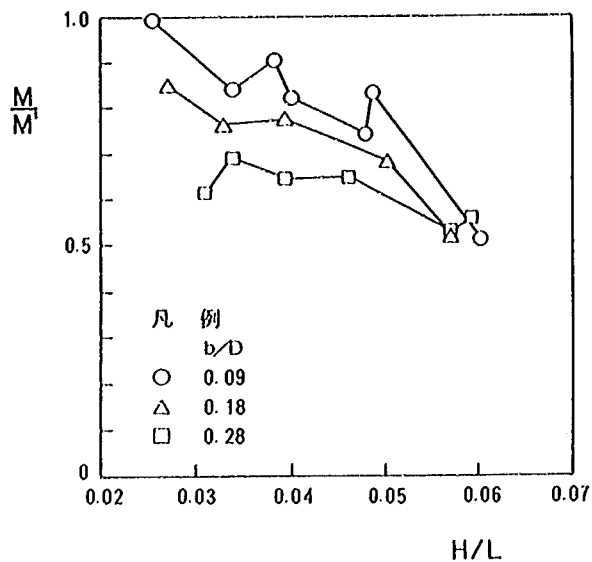
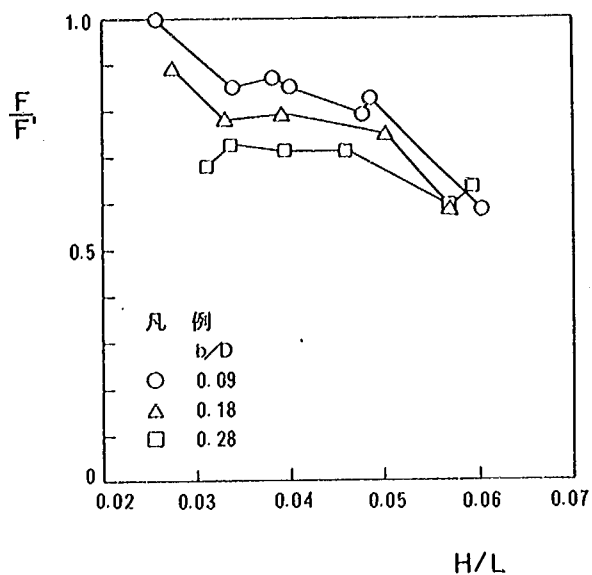


図 8.7 最大水平波力 (F) / 合田波力 (F') と波形勾配 (H/L) の関係
(基本タイプ1列配置, b/Dによる比較)

図 8.8 波力による最大モーメントの実験値 (M) / 合田式 (M') と波形勾配 (H/L) の関係
(基本タイプ1列配置, b/Dによる比較)

する波圧が重複波によるものであるため、反射率に応じて波圧が変化した結果であると考えられる。すなわち、合田式による波圧は反射率がほぼ1の直立壁を対象としたものである²⁾のに対し、実験で扱った構造は反射率が1以下であるため、構造物前面の重複波の波高が直立壁の場合よりも小さくなり、その結果、構造物に作用する波力は、合田式で求めた値より小さくなるものと考えられる。

(3) うちあげ高さ

基本タイプ1列配置モデルに関し、波のうちあげ高さの特性を図 8.9, 8.10 に示す。図 8.9

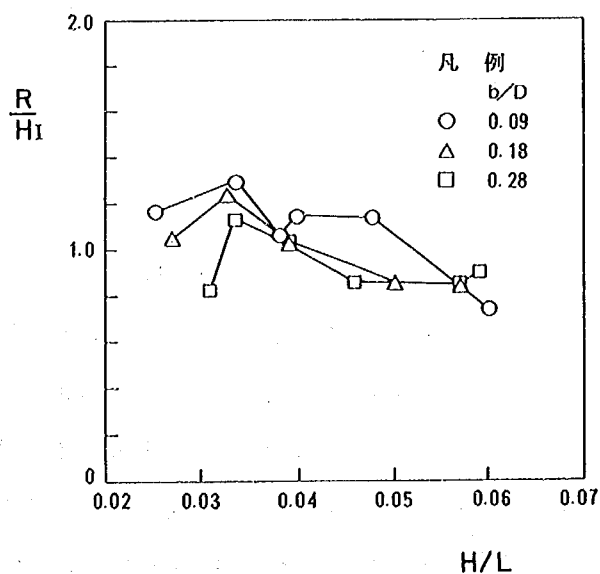
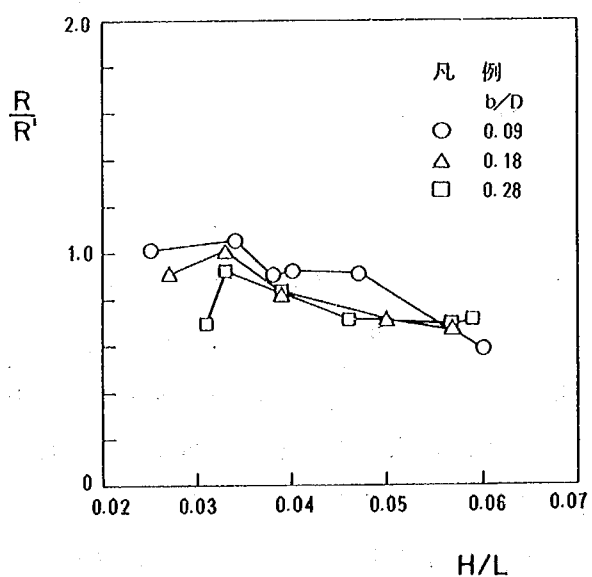


図 8.9 うちあげ高さの実験値 (R) / Sainflou 式 (R') と波形勾配 (H/L) の関係
(基本タイプ1列配置, b/Dによる比較)

図 8.10 うちあげ高さの実験値 (R) / 入射波高 (H₁) と波形勾配 (H/L) の関係
(基本タイプ1列配置, b/Dによる比較)

は、実験値を直立壁における Sainflou のうちあげ高さで無次元化したものであり、図 8.10 は、うちあげ高さを入射波高で無次元化したものである。図より、これらの値は、波圧と同様にセル間隙が広く波形勾配が大きいケースほど小さくなることが分かる。Sainflou 式で無次元化した値は、概ね 1 以下であり、本構造に対する波のうちあげ高さが直立壁より小さくなることが示唆される。これは、Sainflou の解が完全反射の直立壁前面の重複波に関して求められたものである³⁾のに対し、実験で扱った構造は反射率が 1 以下であるため、構造物前面の重複波の波高が直立壁より小さくなったことによるものである。入射波高と比較した場合、図 8.10 に示される通り、うちあげ高さは入射波高の 0.8～1.3 倍程度となる。越波を阻止するのに必要な護岸等の天端高については、過去の実験結果や現地の実例をもとに、砕波点より沖側に建設される構造物の場合、静水面上 $+1.25H_1$ が提案されている⁴⁾が、本構造における波のうちあげ高さの最大値はほぼこの値に等しい。

8.4 本実験

8.4.1 概 説

予備実験結果を参考として、優れた消波効果が得られる構造様式をさらに詳しく検討するために本実験を実施した。実験は、主として反射により透過率の低減を行う基本タイプ型の鋼板セル式海域制御構造物にいくつかの機構を付加して、その消波効果を高めることを目的とした。本実験で付加した機構は大別して下記の 3 通りである。

- ① 波を流れに変える機構（越波タイプ構造）
- ② スリット壁を通過する際のエネルギー損失と、反射波の位相差により消波を行う機構（遊水タイプ構造）
- ③ 渦の形成により、粘性によるエネルギー逸散を図る機構（フラップタイプ構造）

8.4.2 実験方法

実験は、建設省土木研究所水理共同実験棟内の平面水槽において行った。水槽は全長 20.0 m、幅 16.0 m、高さ 0.6 m であり、造波装置としてはペンデュラム型造波機が使用されている。水槽には図 8.11 に示す仮設床を設け、造波板から 3.75 m の区間を水平床とし、そこから 2 m を勾配 1/10 の一様斜面とし、さらにこれより先 4 m を水平床とした。また、水平床より先 5.25 m は勾配 1/15 の一様斜面とした。実験の縮尺は 1/50 とし、実物と模型のスケールは表 8.4 の通りとした。実験は規則波を用いて行い、波浪条件は周期 1.34 秒、波高 2 cm～16 cm とし、実スケールで周期 9.5 秒、波高 1 m～8 m の波を対象とした。

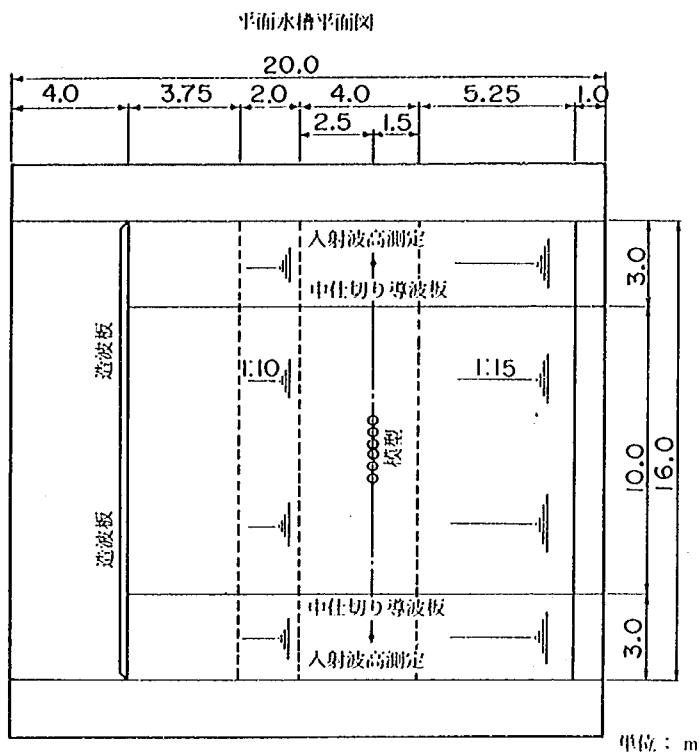
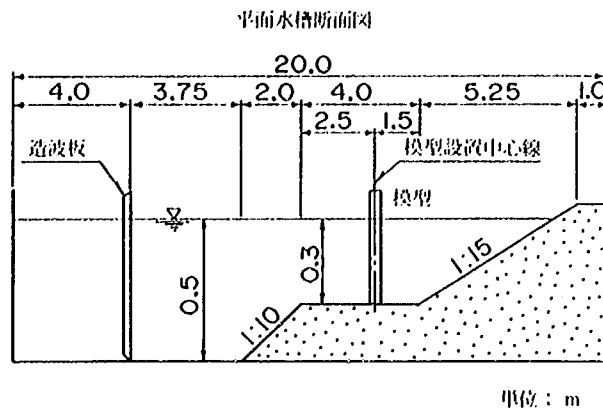


図8.11 模型海浜形状

表8.4 実験スケール

	実 物		模型 (1/50)
セル直径D(m)	基本タイプ ($b/D=0.2$) 越波タイプ	15.9m	0.32m
	基本タイプ ($b/D=0.3$) 遊水タイプ フラップ タイプ	18.5m	0.37m
水 深 h (m)	15.0m		0.30m

※ b ; セル間隙の幅

8.4.3 構造条件

構造条件諸元を表 8.5 および図 8.12 に示す。各構造形式の実験目的は、以下の通りである。

表 8.5 構造条件一覧

構造形式	配置形式	セル間隙比	遊水部諸元
基本タイプ	1列配置	$b/D=0.2$	
		$b/D=0.3$	
越波タイプ	1列配置	$b/D=0.2$	
	千鳥配置	$b/D=0.1$ $b'/D=0.2$	
遊水タイプ	1列配置	$b/D=0.2$	$\epsilon=0.397, \ell=13.7\text{ cm}, \ell'=1.0\text{ cm}, h'/h=0.5, \theta=90^\circ$
			$\epsilon=0.397, \ell=13.7\text{ cm}, \ell'=1.0\text{ cm}, h'/h=0.7, \theta=90^\circ$
			$\epsilon=0.386, \ell=13.7\text{ cm}, \ell'=1.0\text{ cm}, h'/h=0.5, \theta=60^\circ$
			$\epsilon=0.353, \ell=13.7\text{ cm}, \ell'=1.0\text{ cm}, h'/h=0.5, \theta=45^\circ$
フラップタイプ	1列配置	$b/D=0.3$	

※ ϵ : 開口率, ℓ : 遊水室の換算奥行, ℓ' : スリット部材厚

(1) 基本タイプ

本構造は、単純な円筒形の模型を適当な間隔で1列に配置したものであり、鋼板セル式海域制御構造物の基本的な水理特性を把握すると共に、他の構造形式の消波性能を評価する上での基準とすることを目的とした。

(2) 越波タイプ

本構造は、セル体の天端を低くして波が越波するようにしたものであり、セル天端形状と配置形式を工夫することにより、越波による波のエネルギー損失を図った構造である。模型の天端は、斜面と水叩きにより構成されており、斜面を遡上した波が一旦水叩きに落ちた後、透過側の水面に流れ落ちることを利用して、伝達波の再生に必要な水面衝撃を弱めることを狙いとした。配置形式は、1列配置型と千鳥配置型の2通りとした。千鳥配置型は模型を千鳥に配置したものであり、前列（沖側）の模型の高さを後列（岸側）の模型より低くし、沿岸方向から見た時に前列の模型天端と後列の模型天端で連続な斜面が形成されるようにした構造である。本配置形式は、見掛け上の堤体幅を広くすることにより越波時のエネルギー損失を増加させることと、波峰線に対して堤体の反射面に凹凸を付け反射波の位相をずらすことにより、消波効果の向上を狙ったものである。

(3) 遊水タイプ

本構造は、セル体の一部を遊水室とし、遊水室前壁を縦スリットとしたものである。水粒子がスリットを通過する際の急縮、急拡に伴うエネルギー損失と、スリット前面および遊水室隔壁で反射する波の位相差を利用して消波を図る構造である。⁵⁾ 本構造では、遊水室の水深と入射

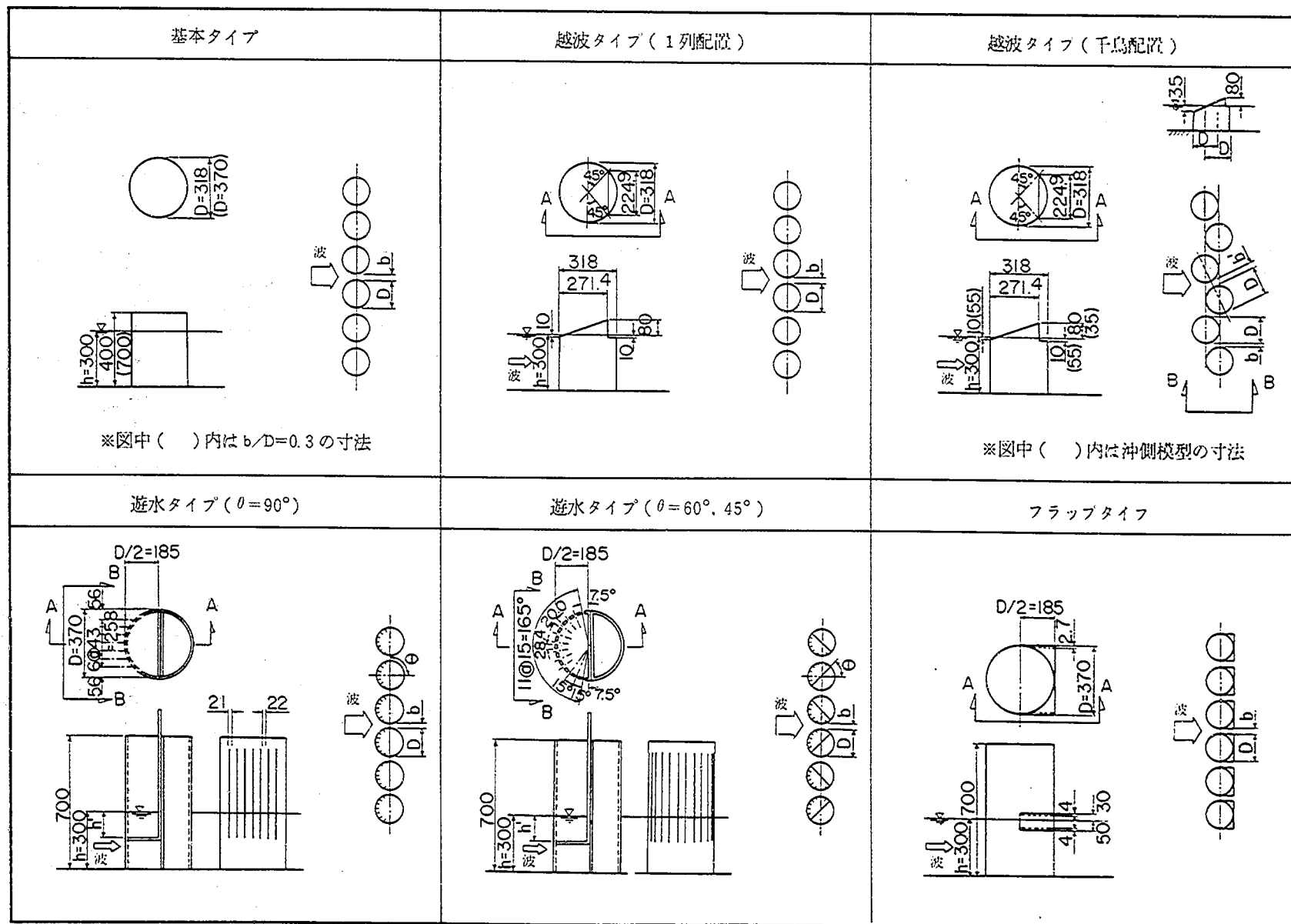


図 8.12 構 造 様 式

(4) フラップ・タイズ

図8.13 フラップタイプ概要

8.4.4 测定方法

○● : 測定位置

反射側

透過側

ϕ_1

ϕ_2

$L/8$

$5 \times L/8$

※ L : 波長

图 8.14 波高测定位置 (1 列配置)

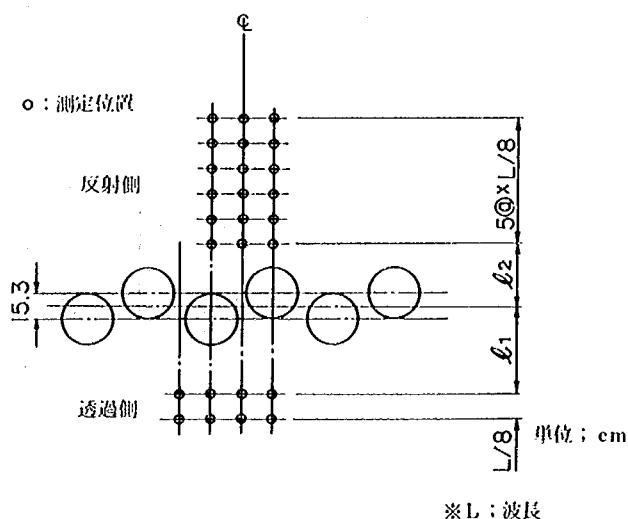


図 8.15 波高測定位置(千鳥配置)

表 8.6 測定位置諸元

構造形式	配置形式	諸 元	ℓ_1/L	ℓ_2/L	備 考
基本タイプ	1列配置	$b/D=0.2$	0.25	0.20	測点は図 8.14 : ○印
		$b/D=0.3$		0.25	
越波タイプ	1列配置	$b/D=0.2$	0.37	0.22	測点は図 8.14 : ○印
	千鳥配置	$b/D=0.1, b'/D=0.2$	0.38		測点は図 8.15 : ○印
遊水タイプ	1列配置	$b/D=0.2, \theta=90^\circ, h'/h=0.5$	0.25	0.20	測点は図 8.14 : ○印
		$b/D=0.2, \theta=90^\circ, h'/h=0.7$			
		$b/D=0.2, \theta=60^\circ, h'/h=0.5$	0.37	0.22	測点は図 8.14 : ○, ●印
		$b/D=0.2, \theta=45^\circ, h'/h=0.5$			
フラップタイプ	1列配置	$b/D=0.3$	0.37	0.25	測点は図 8.14 : ○印

透過側の波の平均的特性をとらえる目的で、模型間隙の背後と模型中心の背後に各 4 点ずつ配置した。

入・反射波高 $H_I \cdot H_R$ としては、模型沖側の 2 ～ 3 本の岸沖方向測線上で得られた値の平均値を用いた。測線は、隣接する模型の条件（構造形式、配置形式等）が等しい場合には模型中心と模型間隙中央を通る 2 測線とし、隣接する模型の条件が異なる場合には、隣接する 2 体の模型中心とそれらの模型の間隙中央を通る 3 測線とした。入・反射波の分離は Healy の方法を用いて行い、最大波高および最小波高としては、反射境界面付近の重複波高の変動域を避け、堤体中心線より沖側に入射波長の 1/4 以上離れた位置での最大値、最小値を用いた。従って、測点の位置は、重複波の腹と節の部分で測定が行われるように、模型タイプ毎に反射側の波の性状に合わせ移動させた。透過率 K_T および反射率 K_R は、このようにして得られた H_I, H_T, H_R より、 $K_T = H_T/H_I, K_R = H_R/H_I$ として算定した。

8.4.5 実験結果

(1) 反射率および透過率

基本タイプの透過率 K_T 、反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を図 8.16 に示す。透過率は波形勾配にあまり依存しない。反射率は波形勾配が大きくなると減少する。間隙比について見ると、透過率は間隙比の影響を顕著に受け、間隙比が大きくなると増加することが

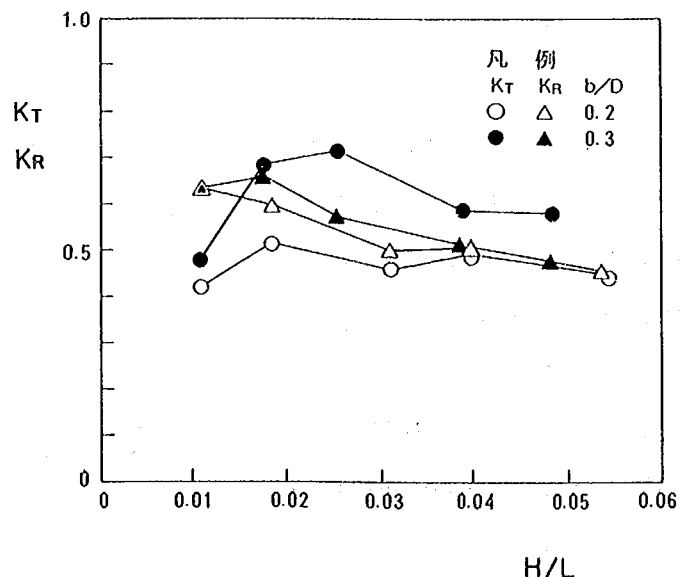


図 8.16 透過率 (K_T)、反射率 (K_R) と波形勾配 (H/L) の関係
(基本タイプ 1 列配置, b/D による比較)

分かる。一方、反射率については $b/D=0.2$ と 0.3 のケースで有意な差が見られず、この範囲では間隙比の影響をあまり受けない。既存の離岸堤の透過率は $0.4 \sim 0.6$ 程度である⁶⁾が、本構造においては、間隙比を 0.3 としたケースで既存の離岸堤より透過率が大きくなる。また、反射率に関しては、港湾構造物の例⁷⁾をもとに 0.5 以下にすることが望まれるが、波形勾配 $H/L \leq 0.03$ の条件では間隙比 0.2 、 0.3 のケース共にこの値を越える。

次に、越波タイプの透過率 K_T 、反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を図 8.17、図 8.18 に示す。

図には、比較のため基本タイプの結果も合わせて表示した。

全体的傾向として、基本タイプに比べ、1列配置、千鳥配置の両ケース共に、透過率は増加し反射率は減少する。1列配置の反射率については、波形勾配 $H/L \leq 0.03$ の条件で基本タイプとほぼ同じ値を示すが、これは、この波浪条件において越波が生じなかったためである。1列配置と千鳥配置を比較すると、透過率、反射率ともに、千鳥配置の方が概ね小さな値を示し、千鳥配置とすることにより消波効果が向上したことが窺われる。波形勾配 $H/L=0.014$ のケースを除き、千鳥配置型の構造では、 $K_T \leq 0.6$ 、 $K_R \leq 0.5$ という条件が満足される。

遊水タイプの透過率 K_T 、反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を図 8.19、図 8.20 に示す。これらの図をもとに遊水室水深および遊水室隔壁方向の、透過率、反射率に与える影響について検討を行う。なお、

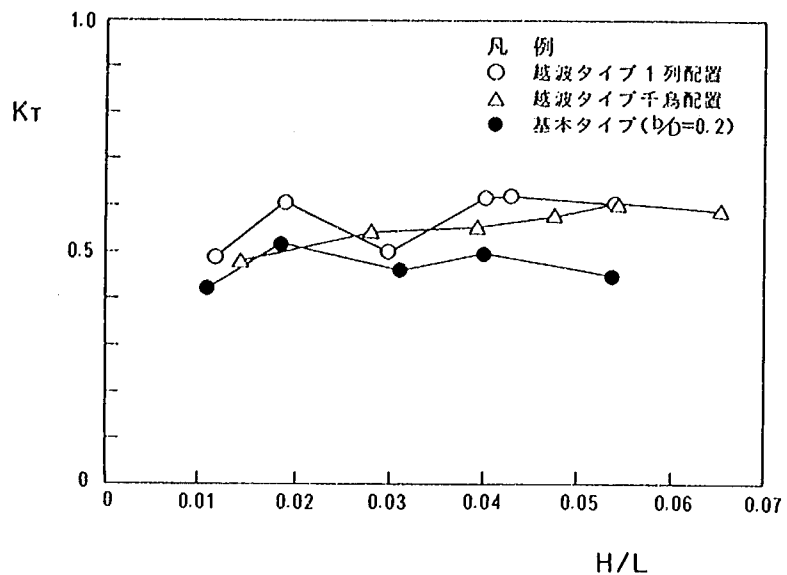


図 8.17 透過率 (K_T) と波形勾配 (H/L) の関係
(越波タイプと基本タイプの比較)

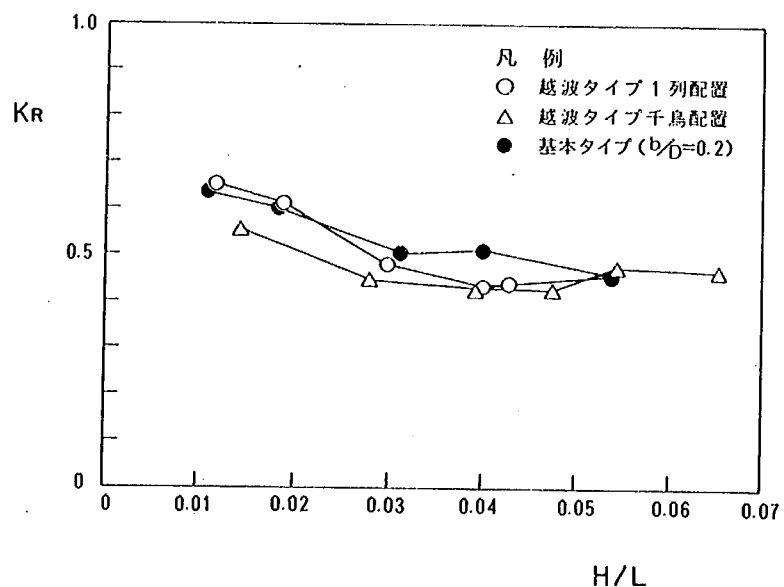


図 8.18 反射率 (K_R) と波形勾配 (H/L) の関係
(越波タイプと基本タイプの比較)

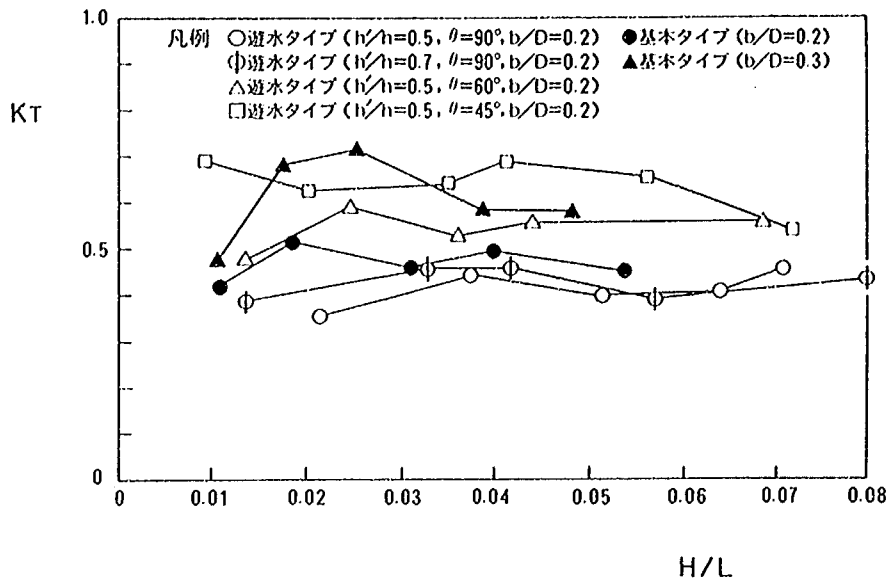


図 8.19 透過率 (K_T) と波形勾配 (H/L) の関係
(遊水タイプと基本タイプの比較)

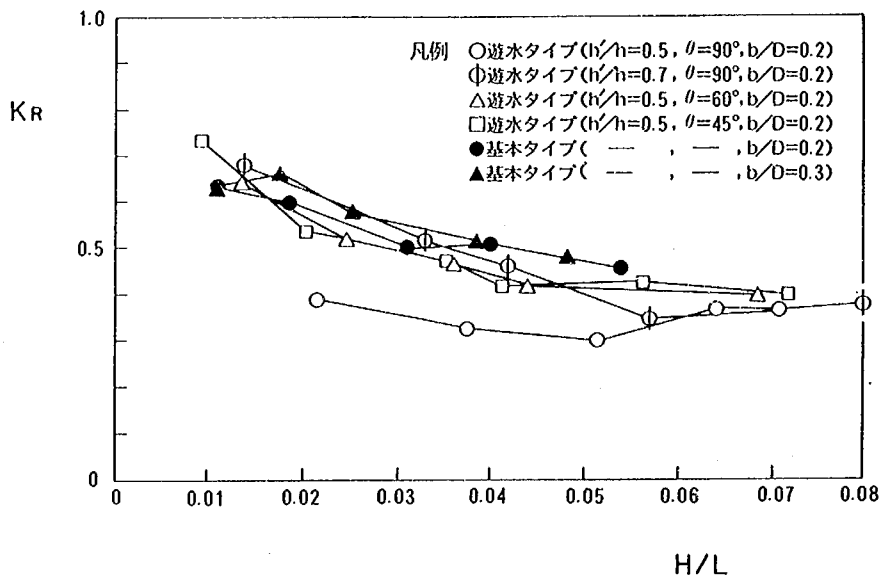


図 8.20 反射率 (K_R) と波形勾配 (H/L) の関係
(遊水タイプと基本タイプの比較)

図には比較のため、基本タイプの結果も合わせて表示した。

遊水室隔壁を入射方向に対して直角に設置した構造に関し、遊水室水深の影響を検討した。透過率は、 $h'/h=0.5$ と 0.7 のケースでほぼ同じ値を示し、遊水室水深の影響はほとんど見られない。一方、反射率に関しては、遊水室水深の影響が顕著であり、 $h'/h=0.7$ のケースに比べ $h'/h=0.5$ のケースの方が、波形勾配 $H/L \leq 0.05$ の条件で $0.1 \sim 0.2$ 程度反射率が小さくなる。基本タイプの反射率と比較すると、 $h'/h=0.7$ のケースでは有意な差は認められないが、 $h'/h=0.5$ のケースでは波形勾配によらず 0.2 程度小さな値となり、本ケースでは遊水室を設けることによ

り反射率がかなり低減されたことが分かる。 $h'/h=0.5$ の遊水タイプ構造では、すべての波形勾配に対して透過率が0.5以下、反射率が0.4以下となり、 $K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$ と言う条件が十分に満足される。

次に、入射方向に対する遊水室隔壁の角度を変えた実験により、遊水室隔壁の向きに関して検討を行った。遊水室隔壁の角度 θ について比較すると、透過率、反射率ともに $\theta=90^\circ$ のケースが最も低い。このことより、遊水タイプ型の構造では、遊水室隔壁を入射方向に対して直角に設置した方が、高い消波効果が得られることが分かる。

セル間隙比の等しい $b/D=0.2$ の基本タイプと比較した場合、 θ を 60° および 45° としたケースでは、反射率はほぼ同じ値であるが透過率がかなり増加しており、基本タイプにおいてセル間隙を広くした場合と同様な傾向を示す。これは、 θ を 60° および 45° としたケースでは、スリット壁を無視すると模型の入射方向投影幅が狭くなり、結果的に、セル間隙を広くしたことに相当するためであると考えられる。すなわち、本構造は遊水室隔壁を円筒形の模型の中心線上に設けたものであるため、スリットを無視すると模型の形状は半円形の断面を持つ柱体となる。このため、投影方向と隔壁の成す角度が 90° から小さくなるにつれて投影幅が本来の円筒体の直径より減少し、その結果、 θ を 90° 以下にしたケースは、実質上、セル間隙を広くしたことに相当すると考えられる。透過率は θ が小さくなるにつれて増加しているが、上記のように考えることによりこの現象が説明される。

フラップタイプの透過率 K_T 、反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を図8.21に示す。基本タイプと比較すると透過率は減少しており、フラップを付加することによって透過波のエネルギーが低減されたことが窺える。本構造では、セル間隙比を0.3としたにも係わらず、透過率は概ね0.6以下となり既存の離岸堤に近い値となる。一方、反射率は基本タイプとほぼ同様であり、フラップは反射側にはほとんど影響を及ぼさないことが分かる。このことより、反射側の波を低減する機構を設けた構造に、さらにフラップを付けることにより、反射側の特性に影響を及ぼすことなく透過率を低減することが可能であると考えられる。

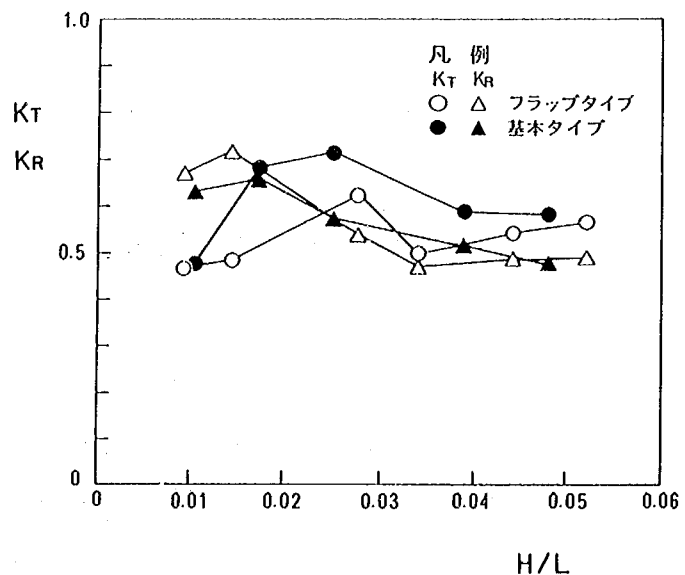


図8.21 透過率 (K_T)、反射率 (K_R) と波形勾配 (H/L) の関係
(フラップタイプと基本タイプの比較; $b/D=0.3$)

(2) エネルギー損失率

入射波が構造物を通過するとき、どの程度のエネルギー損失が生ずるかを示すエネルギー損失率 K_L^2 を次

式により算定し、代表的なケースについてその結果を述べる。

$$K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad (8.3)$$

基本タイプ、越波タイプおよび遊水タイプ模型について、エネルギー損失率 K_L^2 と波形勾配 H/L の関係を図 8.22 に示す。越波タイプは千鳥配置、遊水タイプは $h'/h=0.5$ 、 $\theta=90^\circ$ のケー

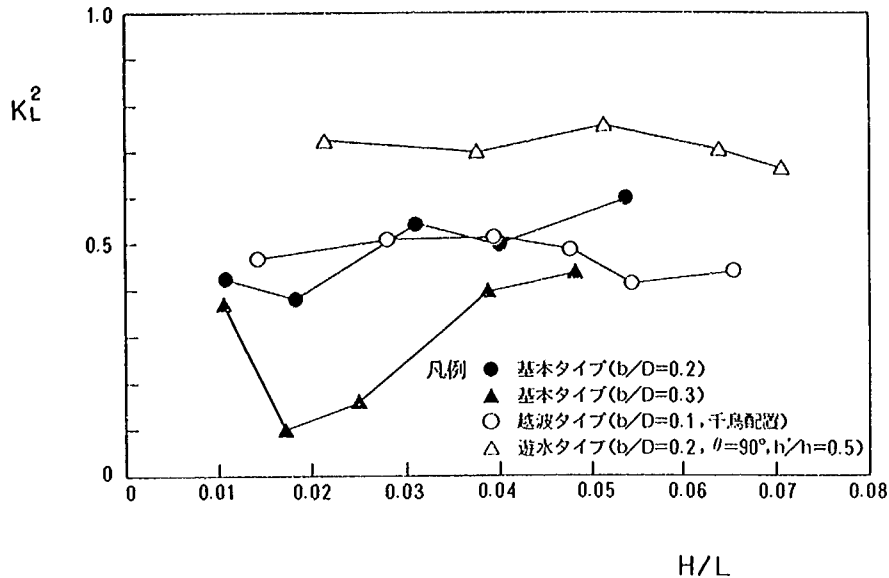


図 8.22 エネルギー損失率 (K_L^2) と波形勾配 (H/L) の関係

スである。基本タイプについて見ると、 $b/D=0.2$ のケースに比べ $b/D=0.3$ のケースは、エネルギー損失率が平均で 0.2 程度小さな値となり、セル間隙が広くなるとエネルギー損失が著しく減少することが示唆される。このことより、基本タイプ型の構造においては、セル間隙を波が通過する際の縮流効果が、消波効果に対して支配的な要因であることが推測される。

海域制御構造物としての透過率および反射率の目標値をそれぞれ 0.6 以下、0.5 以下とすると、エネルギー損失率は 0.4 以上であることが必要となるが、越波タイプおよび遊水タイプについて見ると、両ケース共にこの条件が満足される。遊水タイプ型の構造では、波形勾配によらずエネルギー損失率は 0.7 前後となり本構造の消波効果が非常に高いことが窺える。

8.4.6 遊水室の効果に関する検討

実験では、セル体に遊水室を設けた構造において、高い消波効果が得られた。遊水室による消波効果は、遊水室の水深、遊水室の奥行、スリットの部材厚、スリットの空隙率等、多くのパラメータによって支配される。そのため、これらのパラメータの消波効果に与える影響を実験的に明らかにするためには、非常に多くの労力を要する。従って、ここでは、これらに関し若干の数値解析を行い実験結果と比較することにより、遊水タイプ型の鋼板セル式海域制御構造物として最も効果的な形状を明らかにし、今後の研究の方向を定める足がかりとした。

数値解析結果を図 8.23、8.24 に示す。解析は、微小振幅波理論を用いエネルギー損失項を擬非

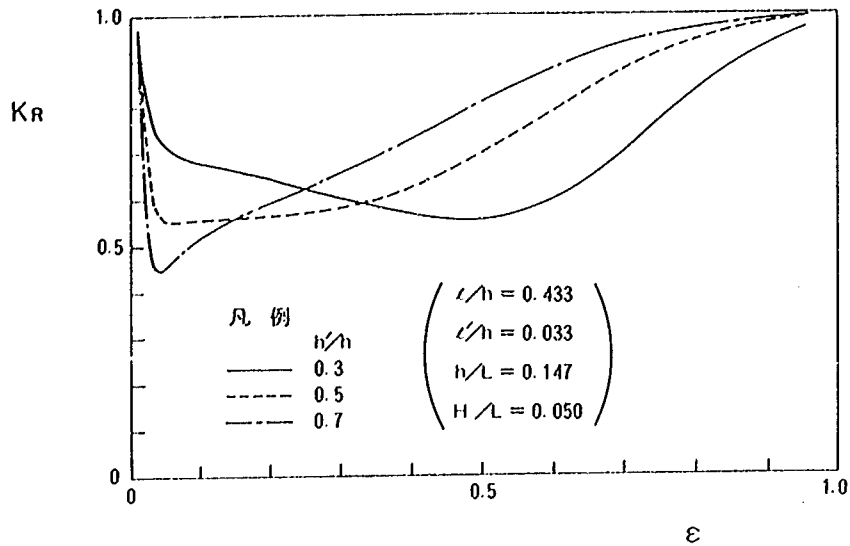


図 8.23 開口率 (ϵ) と反射率 (K_R) の関係
(遊水室水深による比較)

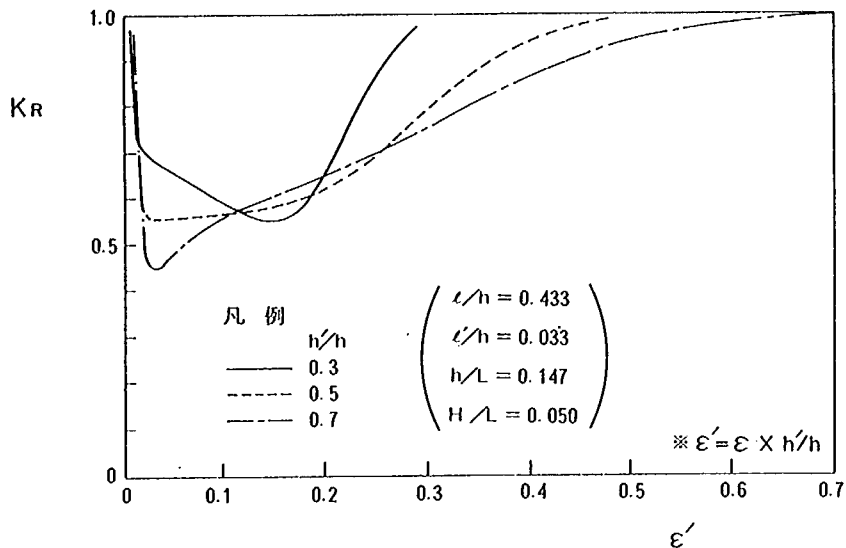


図 8.24 構造物前面の総面積に対する開口率 (ϵ') と反射率 (K_R) の関係
(遊水室水深による比較)

線形として扱った谷本ほかの方法⁸⁾によって行った。

解析に用いた条件は、実験条件に合わせ、実スケールで水深 $h = 15\text{ m}$ 、遊水室奥行 $l = 6.5\text{ m}$ 、スリット部材厚 $l' = 50\text{ cm}$ とし、遊水室水深 h' とスリット空隙率 ϵ を変数とした。また、波浪条件は、代表的な値として周期 $T = 9.5$ 秒、波形勾配 $H/L = 0.05$ を用いた。なお、鋼板セル式海域制御構造物は、透過型の構造物であり断続的に開口部を有するが、ここでは、遊水室の効果をより明確に把握するため、構造物は不透過な連続の壁体としてモデル化した。

図 8.23 より、反射率を最も低くするスリット空隙率 ϵ の最適値は、遊水室水深と構造物設置水深の比 h'/h によって変化し、 h'/h が大きくなるほど減少することが分かる。実験のスリット空隙率 ϵ は 0.397 であり、この時、 $h'/h = 0.7$ のケースより 0.5 のケースの方が高い消波効果を示した

が、図 8.23において $h'/h=0.7$ のケースでは ϵ の最適値は0.1以下であり、実験が最適条件よりかなり離れた所で行われたことが窺われる。一方、 $h'/h=0.5$ のケースでは、反射率 K_R は $\epsilon = 0.05 \sim 0.30$ の範囲でほぼフラットな最小値を示し、実験は最適条件の近くで行われたものと考えられる。

実際に構造物を建設する際の施工性を考えると、遊水室の水深は出来るだけ浅い方が望ましい。この観点より見ると、 $h'/h=0.3$ のケースで ϵ を0.5前後にした場合、 $h'/h=0.5$ のケースにおける最適値とほぼ同様な値が得られており、本構造では、スリット空隙率を大きくすることにより遊水室の水深をさらに浅く出来ることが示唆される。

次に、 ϵ と h'/h の関係について、その最適値を明らかにするため、 ϵ と h'/h の積 ϵ' により解析結果を整理したものが図 8.24である。図より、多少のばらつきを無視すると、 ϵ' の最適値は0.1前後の値であることが分かる。

以上、遊水室の効果に関する検討を行ったが、先にも述べた通り、鋼板セル式海域制御構造物は断続的に間隙を有し、かつ、個々のセルの形状は曲面で構成された円筒体であるため、谷本ほかの理論には適合しない部分がある。従って、本計算結果はあくまで遊水タイプ型の鋼板セル式海域制御構造物の定性的な特性を示すものであり、実際に、個々の構造物に関しその消波特性を明らかにするためには、実験による検証が必要であると考えられる。

8.5 実験結果まとめ

実験により下記の事項が明らかとなった。

- ① 優れた消波効果が得られた構造は、越波タイプ千鳥配置型の構造と遊水タイプ型の構造である。越波タイプ千鳥配置型の構造では、波形勾配の小さな $H/L=0.014$ の条件を除き $H/L=0.028 \sim 0.065$ の範囲で、透過率0.6以下、反射率0.5以下となった。また、遊水タイプ型の構造では、波形勾配 $H/L=0.021 \sim 0.071$ の実験で確認したすべての波浪条件に対して、透過率0.5以下、反射率0.4以下となった。この場合の、遊水タイプ型構造の諸元は、 $\epsilon = 0.397$ 、 $h'/h=0.5$ 、 $\theta=90^\circ$ である。
- ② 遊水型の構造では、遊水室隔壁を入射方向に対して直角に設置した時、高い消波効果が得られる。また、遊水室水深と模型設置水深の比 h'/h に関しては、スリットの空隙率を0.397とした場合、 $h'/h=0.7$ のケースより $h'/h=0.5$ のケースの方が消波効果が高い。
- ③ フラップを取り付けた場合、反射率は変化しないが透過率が低減される。従って、反射率の低減を図った構造にフラップを付加することにより、反射側の特性に影響を及ぼすことなく、透過率を低減することが可能であると考えられる。
- ④ 基本タイプ型の構造に作用する波力および波力によるモーメントは、直立壁より小さくなる。

この傾向はセル間隙が広く波形勾配が大きいほど顕著である。合田式で求めた値との比で表した場合、これらの値は、セル間隙比 $b/D=0.18$ のケースで、波形勾配 $H/L=0.04$ の時0.8程度、波形勾配 $H/L=0.06$ の時0.6程度となる。

8.6 今後の検討課題

(1) 水理特性に関する課題

優れた消波効果が得られた構造は、遊水タイプ型の構造と越波タイプ千鳥配置型の構造であるが、これらの構造においては、その消波効果は下記の通り多くのパラメータによって支配される。

- 遊水タイプ型 ; 遊水室水深, 遊水室奥行, スリット空隙率, スリット部材厚, セル間隙比
- 越波タイプ千鳥配置型; セル配置型式 (セル間隙比, 前列セルと後列セルの距離), セル天端高, セル天端の傾斜角

従って、それらの消波効果に与える影響を明らかにし、設計上最適な条件を見出すことが必要である。

(2) 海浜地形変化に関する課題

海域制御構造物は、従来の離岸堤とは異なり沖合の大水深域に建設されるため、本構造の設置に伴う海浜地形の変化を予測することは重要である。そのためには移動床実験を行い、構造物設置による背後の海浜形状の変化や構造物周辺の洗掘状況を明らかにし、漂砂制御ならびに侵食防止効果について検討する必要がある。

(3) 構造に関する課題

構造に関しては下記の検討を行う必要がある。

- ① 遊水タイプ型および越波タイプ千鳥配置型について、セル体の形状変化に伴う堤体の安定性を検討する。
- ② スリット、フラップ等の付加部材に加わる局所的な波圧の検証と設計法の確立。

(4) 経済性および施工性に関する課題

海域制御構造物は、延長の長い大規模な構造となることが予想され、従って、その経済性は重要な課題となる。また、大水深域においては一般に海象条件が厳しく、そのため、構造物はこのような海域においても十分な施工性を有することが要求される。従って、経済性、施工性に関する検討を行い、施工条件と要求される消波性能に合わせて、経済的な構造を選択して行くことが必要である。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港研資料，№ 248，24p.，1976.
- 2) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港研報告，Vol. 12，№ 3，pp. 31~69，1973.
- 3) たとえば 堀川清司：海岸工学（海洋工学への序説），東京大学出版会，317p.，1975.
- 4) 井島武士・川上善久：日本沿岸の海岸保全のための自然条件と海岸堤防の天端高算定について，第9回海岸工学講演会講演集，pp. 138~142，1962.
- 5) たとえば 近藤徹郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，275p.，1983.
- 6) 建設省河川局海岸課・土木研究所：離岸堤の効果及び安定性に関する研究，第39回建設省技術研究会河川部門指定課題論文集，110p，昭和60年11月.
- 7) 小蔵紘一郎・口田 登・足立一美：低反射・透過型防波堤の設計と施工，海洋開発論文集，Vol. 2，pp. 127~132，1986.
- 8) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究，港研報告，Vol. 21，№ 3，pp. 43~77，1982.

第9章 多孔式消波板を用いた有脚式 消波構造物に関する研究(2)

建設省土木研究所海岸研究室	室	長	宇多	高明
	研	員	村井	禎美
戸田建設株式会社技術開発室	マネージャー		北村	律太郎
	課	長	梅田	宏
	主	任	添田	弘基
	研	員	西牧	均
	研	員	甘利	裕二
	研	員	佐藤	敏文

9.1 まえがき

本研究は、外洋に面した海域の波浪を制御し、静穏域を創成するための海域制御構造物を開発することを目的とする。このため一つの構造物として、多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物を考え、その機能について検討する。本研究は、土木研究所資料№2454「海域制御構造物に関する共同研究報告書(1)」のうちの「8. 多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する実験」¹⁾に続くものである。

上記報告書で述べた水理模型実験によって、当消波構造物の消波効果について以下のような結果が得られた。反射率 K_R 、エネルギー損失率 K_L ²⁾はそれぞれ目標値 $K_R \leq 0.5$ 、 $K_L \geq 0.4$ を満足するが、透過率 K_T については波形勾配0.03以下で目標値 $K_T \leq 0.6$ を満足しない。そこで、波形勾配の小さな波浪条件での透過率を低減するために2枚の鉛直多孔板間に水平多孔板を組み合わせた消波構造(Bタイプ)を考え、鉛直・水平板空隙率、鉛直板吃水比および水平板設置水深比をパラメータとして実験を行い、その消波特性と部分重複波による波力特性を検討した。なお、前報¹⁾では水平板がないモデル(Aタイプ)の波力の結果を割愛したので、本報告ではその結果についても述べることにした。

9.2 実験方法

二次元水路と実験装置の配置を図9.1に示す。透過率は消波装置からの反射の影響を受けるため、反射率と同様に合田らの方法²⁾により波高計3と4の計測値をもとに、透過波と消波装置からの反射波に分離して求めた。模型は縮尺1/50のひずみなし模型であり、鉛直板間に水平板を設

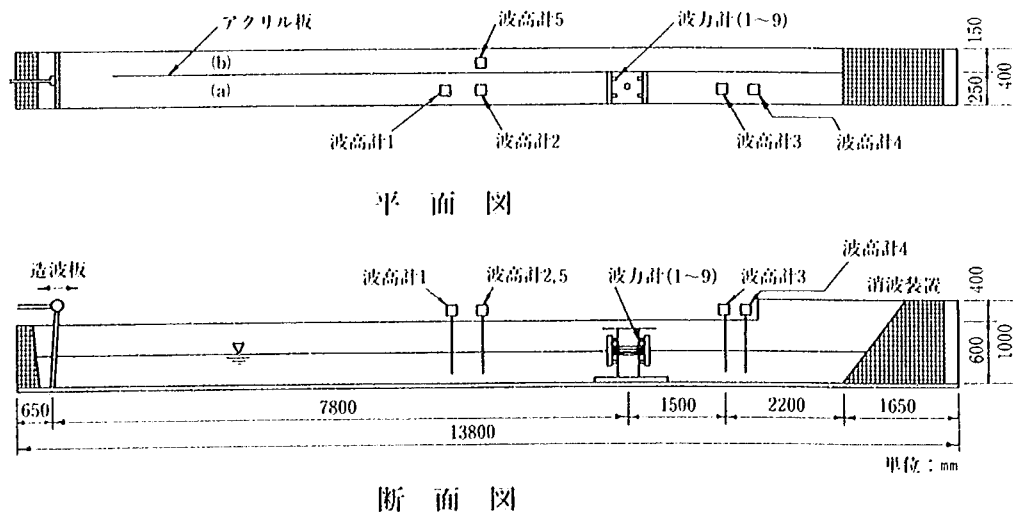


図9.1 実験水路全体図

けた構造のBタイプ(図9.2)である。水平板はこれにかかる鉛直方向波力を測定するために、
架台とは切り放し、ロードセルを介して水槽天端で支える構造とした。

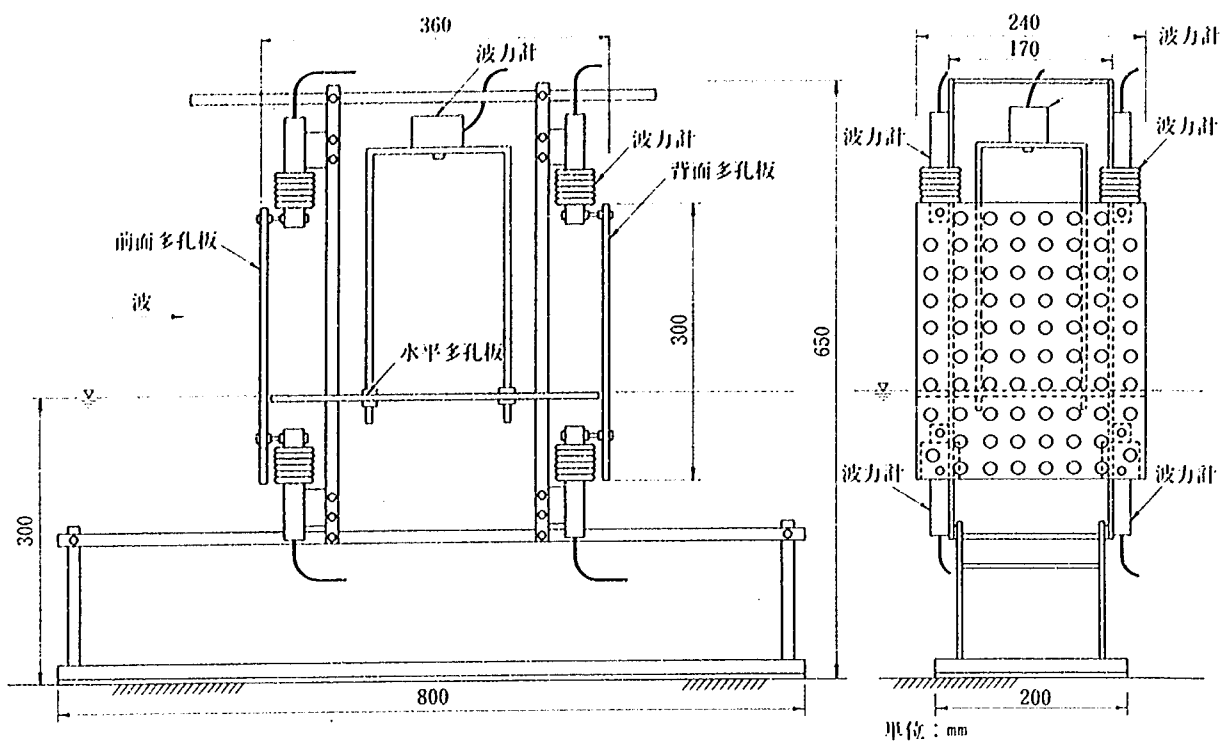


図9.2 実験模型

実験ケースを表9.1に示す。前回のBタイプの模型実験において、消波特性の優れた模型の構造諸元は吃水比0.5, 前面板空隙率0.3, 背面板空隙率0.2, 水平板空隙率0.1, 鉛直板間隔36cm, 孔径1.5cmであり, 水平板を平均水面に設置したものであった。しかし, 波形勾配0.03以下で透過率が目標値0.6を越えたことから, 更に, 波形勾配の小さな範囲での透過率を低減するために, 水平板を水面下に設置するとともに, 鉛直板空隙率を小さくして実験を行った。一方, 波力, 海水

表9.1 実験ケースと構造条件

実験No.	h_2/h	ϵ_l	ϵ_r	ϵ_p	h_{2p}/h	実験模型諸量	記号
8	1	0.3	0.2	0.2	0.1	$h=30\text{cm}$ $B=36\text{cm}$ $\phi=1.5\text{cm}$	
	2	0.5	0.2	0.2	0.1		
	3	0.7	0.2	0.2	0.1		
9	1	0.5	0.3	0.2	0.1		
10	1	0.5	0.2	0.1	0.1		
11	1	0.5	0.2	0.2	0.1		
	2	0.5	0.2	0.2	0.1		
12	1	0.5	0.2	0.2	0.2		
	2	0.5	0.2	0.2	0.3		
13	1	0.7	0.3	0.2	0.1		

交換性の点から、吃水比は小さく、鉛直板と水平板の空隙率はできるだけ大きい方が望ましい。そこで、吃水比、空隙率が波力、消波特性に与える影響も調べた。実験に用いた波浪条件を表 9.2 に示す。

表 9.2 波 浪 条 件

波の番号	波 高 H (cm)	周 期 T (sec)	波 長 L (cm)	波形勾配 H/L	相 対 幅 B/L
1	6	0.85	107	0.056	0.34
2	8	0.85	107	0.075	0.34
3	4	1.0	136	0.029	0.26
4	6	1.0	136	0.044	0.26
5	10	1.1	158	0.063	0.23
6	4	1.4	217	0.018	0.17
7	8	1.4	217	0.037	0.17
8	6	1.7	273	0.022	0.13
9	3	1.7	273	0.011	0.13

9.3 実験結果

9.3.1 透過および反射特性

水平板設置水深比、鉛直板吃水比及び前面板空隙率の影響について実験結果に基づき述べる。

まず、水平板設置水深比 h_{2p}/h と透過率 K_T との関係を図 9.3 に示す。透過率は、実験の範囲内では h_{2p}/h が 0.1 のとき最小値をとり、 h_{2p}/h が 0 と 0.2 ではほぼ同じ値となる。このことより干満による水位変動が水深の 20% 以内であれば、水平板が有効に働くことが分かる。

h_{2p}/h が 0.1 における透過率は、他の h_{2p}/h での透過率に比べ波高が 6 cm 以下の波で特に低くなる傾向があることから波高の影響を受けていることが分かる。なお、図示してないが、反射率は水平板設置水深比が 0 から 0.2 に変化しても若干減少する程度であった。

図 9.4 に鉛直板の吃水比 h_2/h と透過率 K_T との関係を示す。図から明らかなように吃水比が 0.3 から 0.7 に大きくなると透過率は減少する。減少の割合は、波形勾

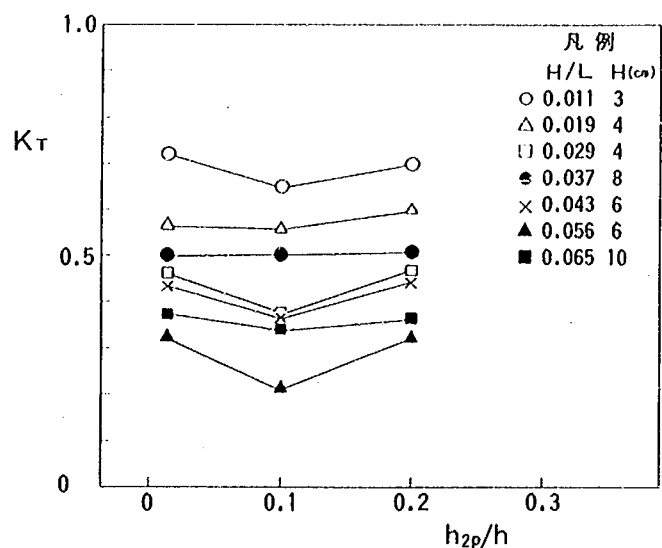


図 9.3 水平板設置水深比 h_{2p}/h と K_T の関係
($B=3.6\text{ cm}$, $h_2/h=0.5$, $\phi=1.5\text{ cm}$,
 $\epsilon_f=0.2$, $\epsilon_r=0.2$, $\epsilon_p=0.1$)

配の小さな波ほど大きい。また、前面板空隙率が0.2から0.3に大きくなると透過率は増大している。これらの結果より、波形勾配0.02程度の波に対しても透過率を0.6以下とするためには、前面板空隙率0.2のとき吃水比を0.5以上、前面板空隙率0.3のときは吃水比を0.7以上としなければならない。

図9.5に鉛直板の吃水比 h_2/h と反射率 K_R との関係を示す。反射率は、吃水比が0.3から0.7に大きくなっても増大する傾向は示さず、波形勾配の小さな波では減少する傾向もみられる。今回の実験模型のうちで最も小さい透過率を示した吃水比0.7の場合でも反射率は0.5以下である。

以上の実験結果から当消波構造物において水平板設置水深比を0.1とし、さらに鉛直板の吃水比を大きくすることで波のエネルギーが効率的に消散されることがわかった。なお、鉛直板下端に各々水平板を取り付けた模型についても実験を行ったが、水平板の効果は透過率を若干改善した程度であり、あまり積極的効果は持たなかった。

9.3.2 部分重複波による波力特性

波力については前面、背面、水平板の各部材に作用する力 F_f , F_r , F_p を別々にロードセルで検出し、 F_f と F_r を同時刻で加算した値を模型全体に作用する水平方向の波力 F_H とした(図9.6参照)。水平波力 F_H は静水面下にある鉛直板の面積を考慮して、次のような無次元係数 f_H で表示した。

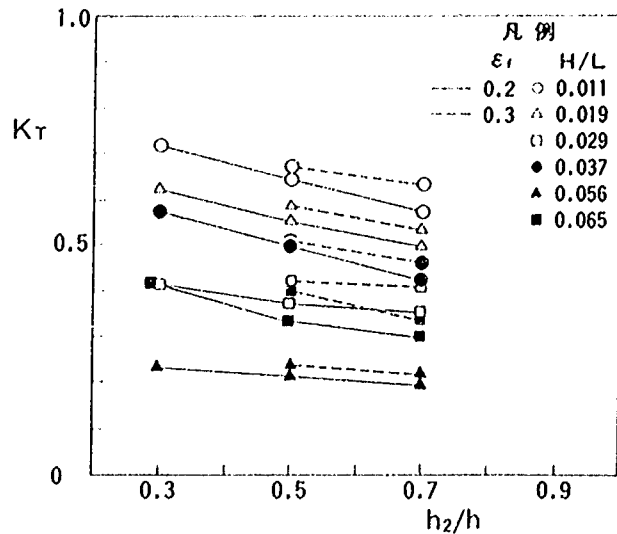


図9.4 鉛直板吃水比 h_2/h と K_T の関係
($B=3.6\text{cm}$, $\phi=1.5\text{cm}$, $\epsilon_f=0.2$, $h_{2p}/h=0.1$, $\epsilon_p=0.1$)

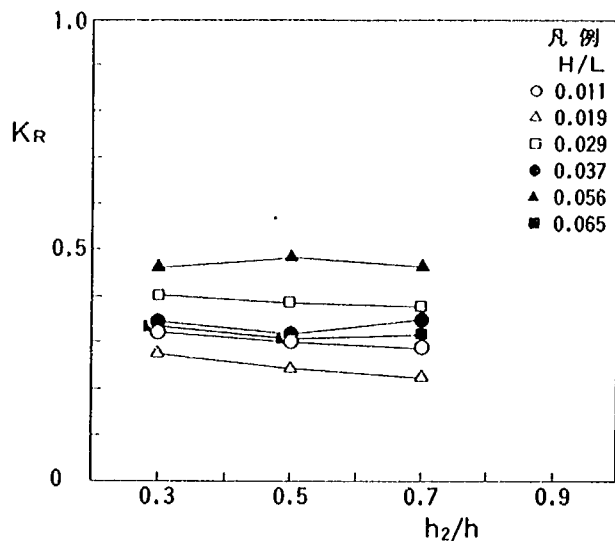


図9.5 鉛直板吃水比 h_2/h と K_R の関係
($B=3.6\text{cm}$, $\phi=1.5\text{cm}$, $\epsilon_f=0.2$, $\epsilon_r=0.2$, $h_{2p}/h=0.1$, $\epsilon_p=0.1$)

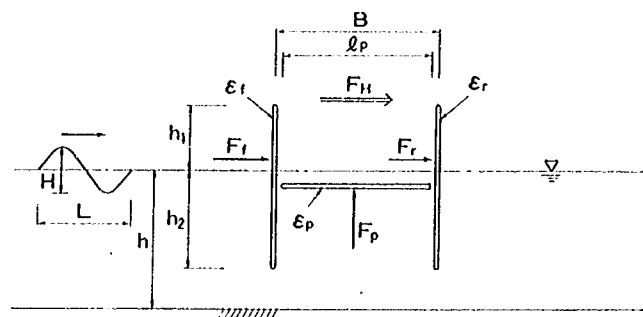


図9.6 波力の定義

$$f_H = \frac{F_H}{w_0 b h_2 H} \quad (9.1)$$

ここに、 b は鉛直板の水路幅方向の長さ、 w_0 は水の単位体積重量である。

図 9.7 は B タイプと前回実験した水平板のない A タイプの水平波力の係数 f_H を比較したものである。ここに A タイプの条件は前背面板空隙率が 0.2、鉛直板間隔が 3.6cm、孔径 1.5cm である。吃水比 0.5 の場合は A タイプと B タイプはほぼ同程度の値を示すが、吃水比 0.7 の場合には顕著な差がみられ、水平板のある B タイプの f_H は水平板のない A タイプの 4/5 程度に減少している。

図 9.8 は B タイプの相対幅 B/L と水平波力の係数 f_H の関係を示したものである。 f_H は B/L が小さく、すなわち波長 L が長くなると漸次増加するが、実験の最大波長 ($L = 271\text{cm}$) のところで逆に減少する傾向を示している。前面板空隙率 ε_f を大きくすると f_H は減少する。一方、背面板空隙率 ε_r を小さくしても f_H はほとんど変わらない。

構造物全体に作用する波力は消波構造物の安定性を検討する際に重要であるが、設計に際しては各部材に作用する波力が問題となる。このため、各消波板に作用する部材波力についても検討を行った。部材波力 F_f , F_r , F_p は静水面下にある多孔板の面積を考慮して、次のような無次元係数 f_f , f_r , f_p で表示した。

$$f_f = \frac{F_f}{w_0 b h_2 (1 - \varepsilon_f) H} \quad (9.2)$$

$$f_r = \frac{F_r}{w_0 b h_2 (1 - \varepsilon_r) H} \quad (9.3)$$

$$f_p = \frac{F_p}{w_0 b \ell_p (1 - \varepsilon_p) H} \quad (9.4)$$

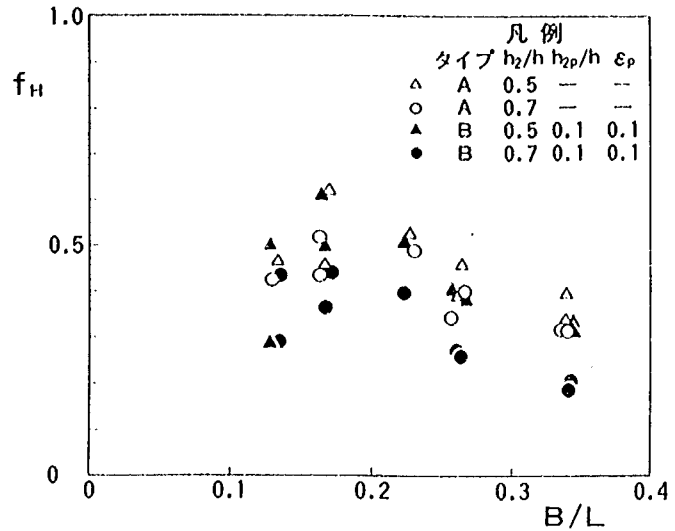


図 9.7 A・B 両タイプの B/L と f_H の関係
($B = 3.6\text{cm}$, $\phi = 1.5\text{cm}$, $\varepsilon_f = 0.2$, $\varepsilon_r = 0.2$)

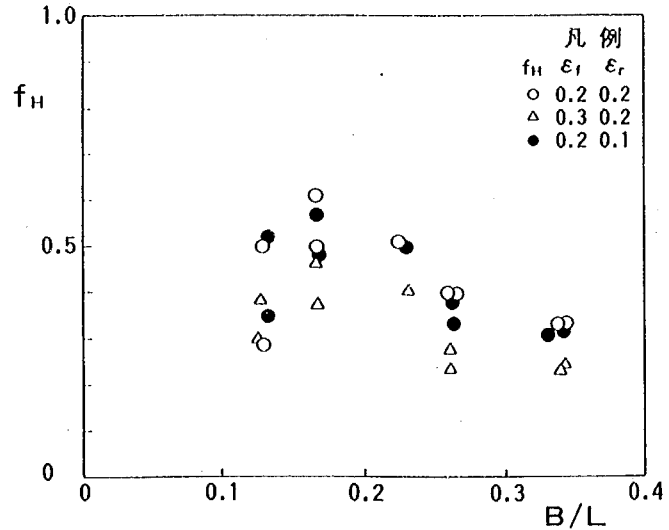


図 9.8 B タイプの B/L と f_H の関係
($B = 3.6\text{cm}$, $h_2/h = 0.5$, $\phi = 1.5\text{cm}$, $h_{2p}/h = 0.1$, $\varepsilon_p = 0.1$)

ここに、 l_p は水平板の水路長方向の長さである。

図 9.9 は B タイプと前回実験した A タイプの部材波力を比較したものである。B タイプの前背面板に各々作用する波力は水平板のない A タイプより小さい。低下の程度は波長によって異なるが、 $B/L > 0.16$ の範囲では概ね A タイプの $1/2 \sim 3/4$ に低下している。図中の記号◇は前面板に作用する波力を合田式³⁾で計算したものである。吃水深と空隙率を考慮し、さらに実験値と同様に次式のように表示した。

$$f_G = \frac{\int_{-h_2}^{\eta^*} p_G(z)(1-\varepsilon)b \, dz}{bh_2(1-\varepsilon)w_0H} \quad (9.5)$$

ここに、 $p_G(z)$ は合田式における波圧分布、 $\eta^* = \min\{1.5H, h_1\}$ 、 h_1 は消波板の静水面からの天端高である。

図 9.10 は前面板の水平波力の係数 f_f を合田式による波力の係数 f_G で除したものである。図から明らかなように実験値は合田式の値より小さく、空隙率による受圧面積の減少分以上に波力は減少する。特に水平板のある B タイプの f_f は、 f_G のほぼ半分である。

図 9.11 に水平板空隙率を $\varepsilon_p = 0.1, 0.3$ とした場合の B タイプの部材波力を示す。 ε_p を大きくすると f_p は小さくなり、逆に f_f は大きくなる。しかし波長が短くなるとその影響は小さくなる。一方、 f_f は ε_p を変えてもほとんど変化しない。すなわち実験の範囲内では水平板の空隙率の変化は前面板の波力に影響を及ぼさない。

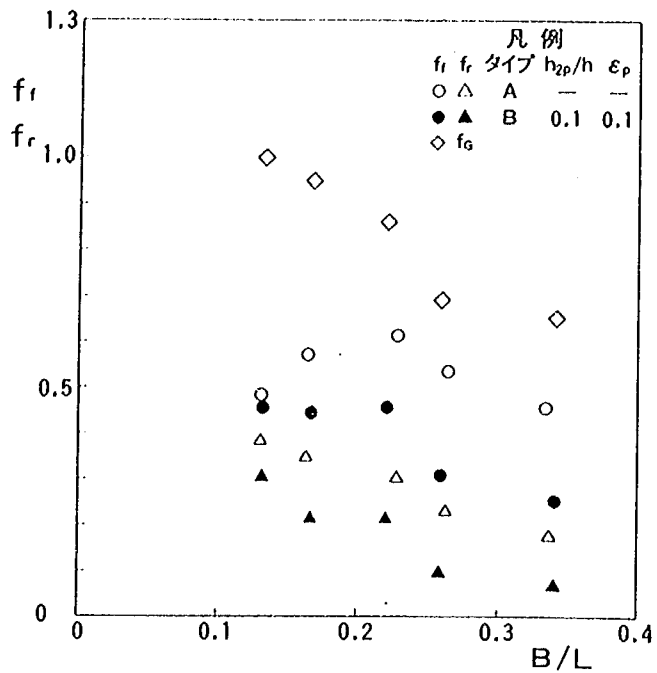


図 9.9 A・B 両タイプの B/L と f_f, f_r の関係
($B=3.6\text{cm}$, $h_2/h=0.7$, $\phi=1.5\text{cm}$,
 $\varepsilon_f=0.2$, $\varepsilon_r=0.2$)

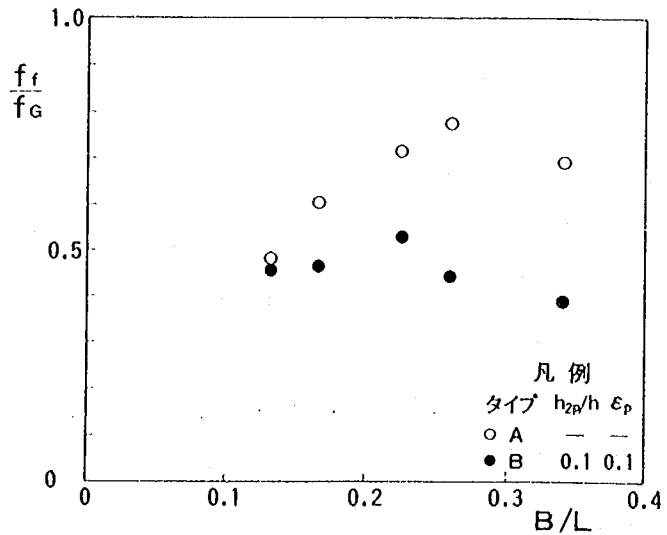


図 9.10 A・B 両タイプの f_f と合田式による f_G の比較
($B=3.6\text{cm}$, $h_2/h=0.7$, $\phi=1.5\text{cm}$,
 $\varepsilon_f=0.2$, $\varepsilon_r=0.2$)

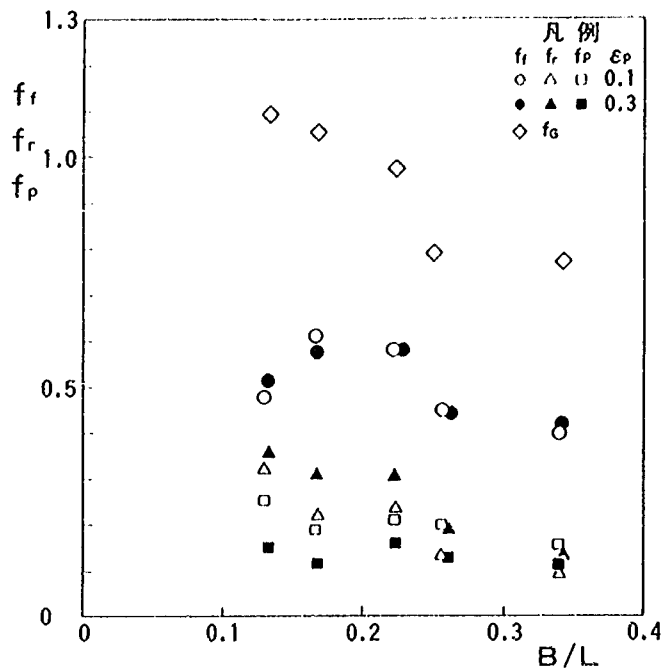


図 9.11 B タイプの B/L と f_t, f_r, f_p の関係

($B=3.6\text{cm}$, $h_2/h=0.5$, $\phi=1.5\text{cm}$, $\varepsilon_f=0.2$, $\varepsilon_r=0.2$, $h_{2p}/h=0.1$)

9.4 結 論

2 枚の鉛直板に水平板を組み合わせた消波構造物の水理模型実験の結果から得られた主要な点を以下に要約する。

- (1) 水平板設置水深比 h_{2p}/h が 0.1 付近で透過率は最も小さくなる。
- (2) 波形勾配 $H/L \geq 0.02$ の波浪条件に対して透過率 $K_T \leq 0.6$, 反射率 $K_R \leq 0.5$ を満足する構造諸元は, 吃水比 $h_2/h=0.5$ の場合, $\varepsilon_f=0.2$, $\varepsilon_r=0.2$, $\varepsilon_p=0.1$, $h_{2p}/h=0.1$ であり, 吃水比 $h_2/h=0.7$ の場合には, $\varepsilon_f=0.3$, $\varepsilon_r=0.2$, $\varepsilon_p=0.1$, $h_{2p}/h=0.1$ となる。
- (3) 前面板空隙率を大きくすると水平方向の全体波力は小さくなる。このため構造物の安定性から考えると前面板空隙率は大きい方がよい。しかし空隙率は消波効果の面から制約を受ける。
- (4) 水平板を取り付けることにより, 前背面鉛直板に各々作用する波力を低減することができる。
- (5) 水平板空隙率を大きくすると, 水平板に作用する波力は減少するが, 背面板に作用する波力は増加する。

9.5 今後の課題

多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物の消波特性については満足できる結果が得られたが、想定される対象海域の厳しい海象条件と在来工法の欠点を補うことを考えれば、以下の各課題について検討する必要がある。なお昭和62年度より、同様な消波構造タイプを検討中である新日本製鐵株式会社と同一のグループを組んだ上で共同研究を進めるため、以下の各課題は建設省土木研究所、新日本製鐵株式会社、戸田建設株式会社で実施する予定である。

- (1) 当消波構造物に作用する砕波力も含めた波力について実験を行い、設計波力の決定法を検討する。
- (2) 海浜地形の変化、海水交換性について当消波構造物を設置したことによる効果を検討する。
- (3) 地盤・海象条件と構造物基礎形状による海底面の洗掘の現象およびその対策工を検討すると共に、基礎の安定性、施工性、杭基礎の際の引抜き支持力の評価法について検討する。
- (4) 構造、安全上、信頼できる経済的な消波構造物を選定し、その設計法を確立する。特に、杭と構造物との接合部の信頼できる構造を決定し、動水圧荷重と繰返し交番荷重を受ける部材の安全性を明らかにする。
- (5) 地盤・海象条件に適した経済的な施工法を選定する。特に構造物の設置法および杭基礎とその構造物との接合部の施工法について検討する。

最後に、本研究を行うに当たり、ご指導を頂いた早稲田大学理工学部吉川秀夫教授、同鮎川登教授および同流体実験室の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 宇多高明・村井禎美・北村律太郎・梅田宏・添田弘基・西牧均・甘利裕二・佐藤敏文：海域制御構造物に関する共同研究報告書(1)，8. 多孔式消波板を用いた有脚式消波構造物に関する実験，土木研究所資料，№ 2454，pp. 107～119，1987.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，№ 248，24 p，1976.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，5.2 直立壁に作用する波力，pp. 2-106～2-108，1979.

第10章 フレキシブルマウンドの波浪制御 効果に関する検討

建設省土木研究所海岸研究室 室 長 宇多 高明

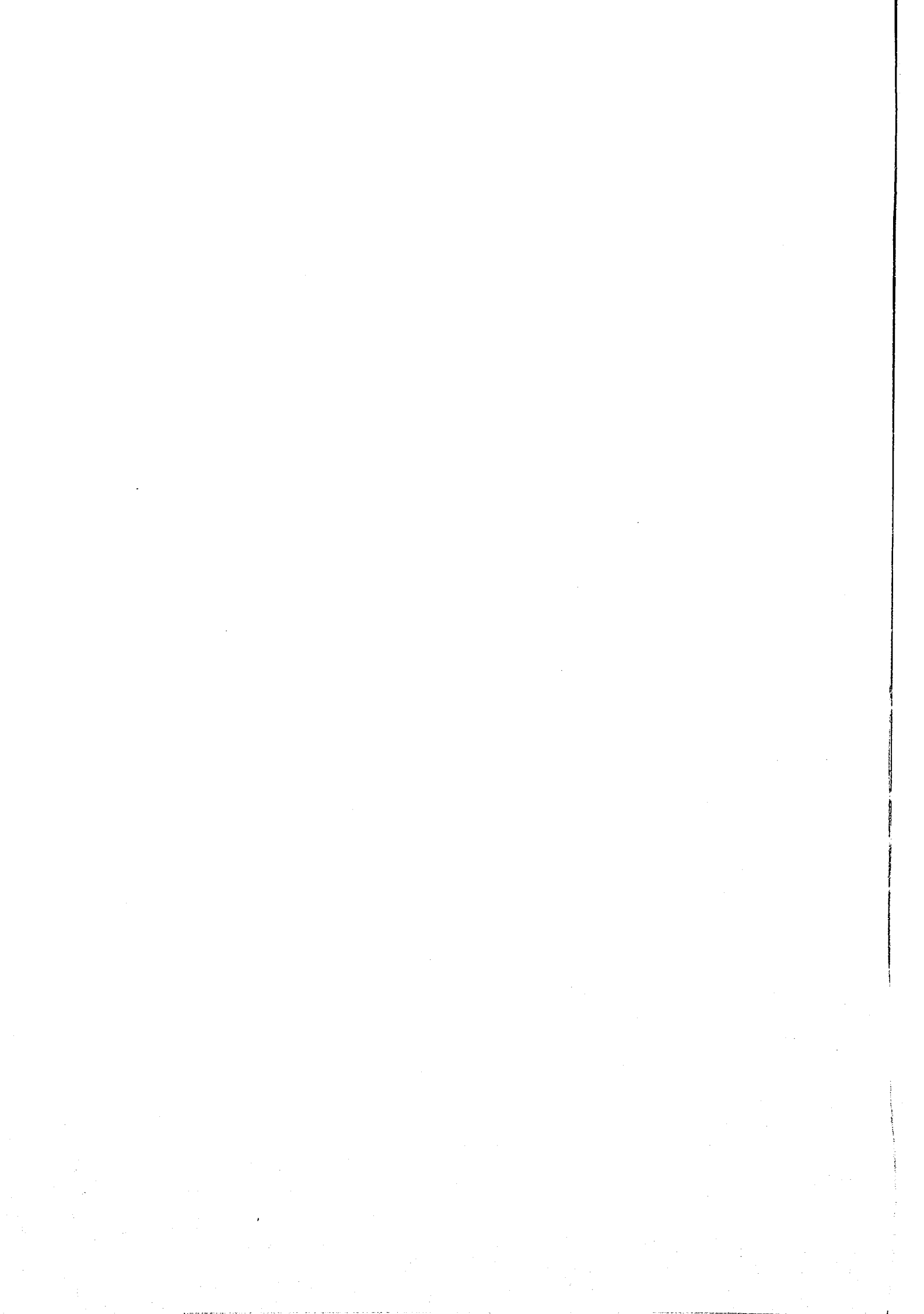
研究員 村井 禎美

清水建設(株)技術研究所 田中 正博

三俣 正和

大山 巧

大崎研究室 清川 哲志



1 Q 1 まえがき

本研究は、没水型海域制御構造物のうち柔らかい可撓性の膜に水を充填して形成される柔構造潜堤（以下、フレキシブルマウンドと称する）について、波の透過および反射に関する模型実験を行い、その水理特性を明らかにしたものである。

没水型構造物は、美観を損なわず、ボート、漁船などの船舶の航行を妨げず、また、海水交換の機能に優れているなどの利点を有している反面、頭出しの構造物と同程度の消波性能を得るためには、構造物の断面寸法を大きくしなければならないという欠点がある。

フレキシブルマウンドはこの欠点を克服するために考案したもので、可撓性の膜でできた袋体の中に海水、または海水と土砂を充填して形成されるので、従来の防波堤や潜堤のように、水深の増加と共に著しく使用材料が増加するということがない。また、波浪条件や海域の利用目的に応じて、フレキシブルマウンドの形状や寸法を変えて、波を制御することも可能である。

フレキシブルマウンドは、上記のように優れた特長を有するものと思われるが、これまで研究も行われていないので、その水理特性は全く分かっていない。

本研究は、まず、剛モデルと柔モデルを用いて、柔構造と剛構造の波の透過および反射特性を比較検討し、次に、フレキシブルマウンドの諸元、波浪条件と波の透過・反射特性との関係を把握し、フレキシブルマウンドの基本的な水理特性を明らかにしたものである。

1 Q 2 実験装置および模型

実験に用いた水槽は、全長40m、幅4m、深さ1.3mの片面一部ガラス張りで、水槽の一端には油圧式造波装置が、反対側の端には消波装置がそれぞれ取り付けられている。水槽は中仕切り板で0.6mと3.3mの二つの水路に分離されている。本実験では波高の大きい波を得るため、図10.1に

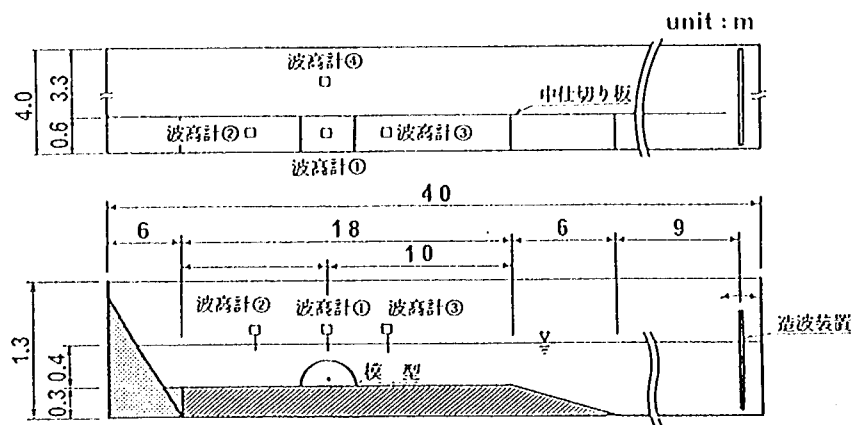


図10.1 実験装置全体図

に示すように、幅0.6mの水路を造波板から9mの地点から勾配1/20の一樣斜面として水路の底面を0.3mかさ上げした。さらに、この地点から18mは水平床とした。

使用した模型は、図10.2に示すように、形状の異なる3つの塩ビ製の剛モデル模型と、同じ形状で剛性の異なる3つのゴム膜製の柔モデル模型の合計6個である。但し、柔モデルはゴム膜製なので、中に注入する水の量によって若干形状が異なる。

剛モデルは、柔モデルと波浪制御特性を比較し易いように、予め計算で求めた柔モデルの静的な釣り合い形状（初期形状）と一致するように製作した。すなわち、剛モデルのタイプAは柔モデルの内圧を十分大きくした場合の形状に、タイプBは内圧を少しだけ加えた場合の形状にそれぞれ相当する。

潜堤のような没水型構造物の消波特性は、天端上水深と波高との比および天端幅と波長との比によってほとんど決まる。したがって、剛モデルのタイプAおよびタイプBのような形状の場合、堤体の波の透過側1/4～1/3は消波に関与しない（不要な）部分と考えられる。そこで、タイプCのように、傾斜したマウンドの上に偏平な円弧面を乗せ、砕波に必要な斜面と波高の減衰に必要な水深の浅い領域（天端幅に相当）を大きくしたモデルを製作した。剛モデルタイプCの形状は、傾斜したマウンドの上に内圧が大きく、かつ膜長の短い柔モデルを乗せた場合の形状に相当する。一方、柔モデルは剛モデルのタイプAと同じ外観寸法で、膜の伸びがないタイプA，膜の少し伸

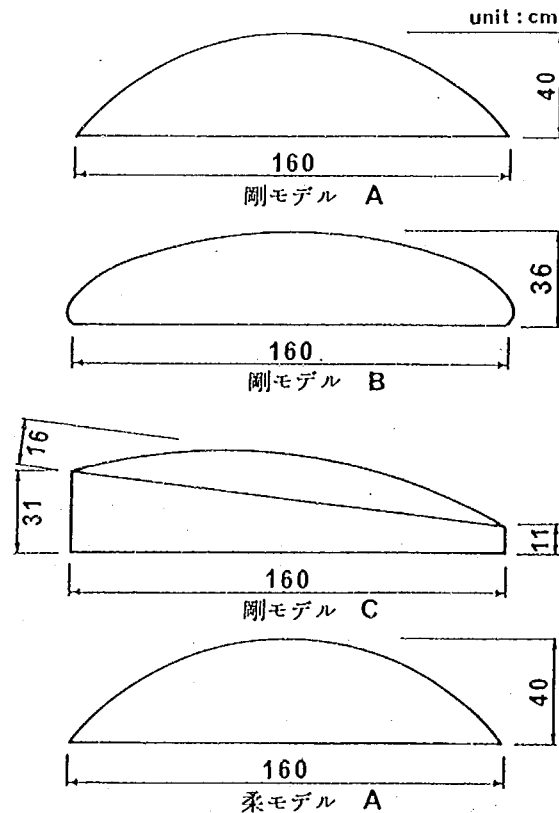


図10.2 使用した模型の形状・寸法

びるタイプBおよび膜の伸びが大きいタイプCの3つのタイプを製作した。各系モデルには、注排水用のチューブと空気抜き用の口を取り付けた。また、モデルの運動の二次元性が保たれるように、膜面に水槽の側壁と直交するようにアルミ製のロッドを16本配した。

本実験で使用している模型および波浪に関する記号は、図10.3に示すとおりである。

従来、没水型構造物の消波特性を評価する構造物の諸元としては、天端幅が用いられている。本研究で取扱っている構造物の断面形状は円弧状であるので、天端幅を明確に規定することができない。そこで、他の実験データと比較できるように、換算天端幅 B' を定義する。すなわち、図10.4に示すように換算天端幅 B' は、堤体幅 D 、堤体の高さ e の円弧状の断面積 S と、 S 、 D および e が等しい台形の天端幅で、次式で求められる。

$$B' = D - (2e / \tan \alpha) \quad (10.1)$$

$$\tan \alpha = e^2 / (eD - S) \quad (10.2)$$

剛モデルのタイプAおよびタイプBの B' は、それぞれ63.6 cmおよび61.7 cmとなる。 B'/D は約0.4であるから、相対堤体幅 D/L を0.4倍すれば、概ね従来の没水型構造物の相対天端幅になると考えてよい。

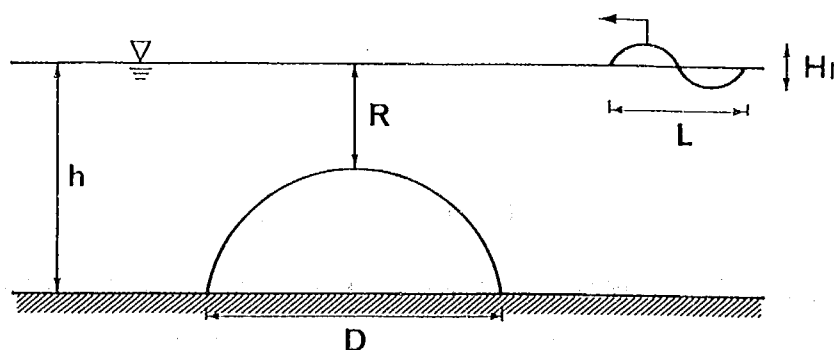


図10.3 記号の説明

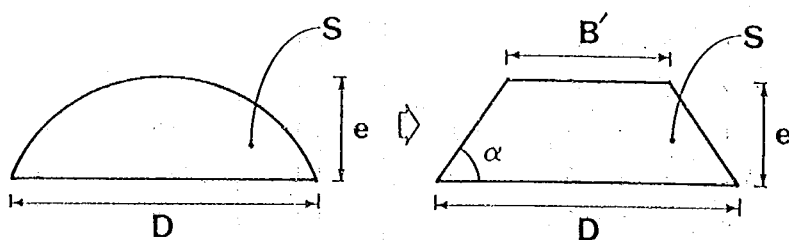


図10.4 換算天端幅 B'

10.3 実験方法

波浪制御に関する実験では、入射波、透過波および反射波を同時に測定することが望ましいが、本実験では水槽をかさ上げして使用したため同時測定が困難であった。そこで、まず、模型を設置しないで入射波を測定し(図10.1の波高計①)、次に造波板から25mの位置に模型を設置して、同じ条件の波を作用させて透過波および反射波を測定した。この方法による波高の再現性をチェックするため模型実験に使用しない幅3.3mの水路に波高計④(図10.1参照)を設置し、各実験ケースの模型を設置しない場合と模型を設置した場合の波高の誤差は5%以内に収まるようにした。

図10.1に示すように、入射波高は模型の設置予定位置の波高計①で、透過波高は模型の中心から3.9m後方の波高計②で測定した。また、反射波は模型の中心から2m離れた位置から波高計③を自走式台車で造波板側にゆっくり移動させて測定した。

なお、入射波高および透過率は波形が定常になった後の10波を平均して求められたものを、また、反射率は移動測定で得られた波高を用いHealyの方法で求められた値をそれぞれ用いた。

柔モデルの場合柔らかさ、あるいは変形のし易さを表わすパラメータが重要であるが、本実験では模型の内部に過剰に付加した水圧(以下、付加水圧という) Δp と膜材の弾性定数 E で表すこととした。なお、付加水圧は模型の注排水口に取り付けた管をマンメータとし、これにより測定した。

本実験で使用した模型の条件を表10.1に、波浪条件を表10.2にそれぞれ示す。また、写真10.1および写真10.2に、それぞれ剛モデルおよび柔モデルの実験状況の例を示す。

表10.1 模型条件

模型ケース番号	模型分類	付加水圧 Δp (gr/cm ²)	天端水深 R (cm)	水深 h (cm)	弾性定数 E (Kg/cm ²)
R・A1	剛モデルA	—	10	50	—
R・A2	剛モデルA	—	5	45	
R・B1	剛モデルB	—	9	45	
R・B2	剛モデルB	—	4	40	—
R・C1	剛モデルC	—	10	50	
R・C2	剛モデルC	—	5	45	
F・A1	柔モデルA	0.4	13	50	1090
F・A2	柔モデルA	2.3	13	50	
F・A3	柔モデルA	4.9	12	50	
F・B1	柔モデルB	2.3	16	55	63
F・B2	柔モデルB	5.6	10	55	
F・C1	柔モデルC	5.4	8	55	22

表1Q2 波 浪 条 件

実験番号	入射波高 H ₁ (cm)	周 期 T (sec)	沖波波長 L ₀ (cm)	波 長 L (cm)	相対水深 h/L	相対堤体幅 D/L
1	4	0.83	108	106	0.38	1.52
2	8			106	0.42	1.50
3	12			107	0.47	1.50
				107	0.51	1.49
4	4	0.90	127	122	0.33	1.31
5	8			124	0.36	1.29
6	12			125	0.40	1.28
				125	0.44	1.28
7	4	1.00	156	146	0.27	1.09
8	8			149	0.30	1.07
9	12			151	0.33	1.06
				153	0.36	1.05
10	4	1.10	189	170	0.24	0.94
11	8			175	0.26	0.92
12	12			178	0.28	0.90
				181	0.30	0.89
13	4	1.20	225	194	0.21	0.83
14	8			200	0.23	0.80
15	12			205	0.24	0.78
16	16			209	0.26	0.77
17	4	1.40	306	239	0.17	0.67
18	8			249	0.18	0.64
19	12			257	0.20	0.62
20	16			264	0.21	0.61
21	4	1.60	400	283	0.14	0.57
22	8			296	0.15	0.54
23	12			308	0.16	0.52
24	16			318	0.17	0.50
25	4	1.80	506	327	0.12	0.49
26	8			343	0.13	0.47
27	12			357	0.14	0.45
28	16			370	0.15	0.43
29	4	2.00	625	369	0.11	0.43
30	8			388	0.12	0.41
31	12			405	0.12	0.40
32	16			421	0.13	0.38
33	4	2.80	1,224	535	0.08	0.30
34	8			565	0.08	0.28
35	12			593	0.08	0.27
36	16			619	0.09	0.26
37	4	3.30	1,700	637	0.06	0.25
38	8			674	0.07	0.24
39	12			708	0.07	0.23
40	16			740	0.07	0.22

波長 L , 相対水深 h/L , 相対堤体幅 D/L は, 上段よりそれぞれ, 水深40 cm, 45 cm, 50 cmおよび55 cmの場合の値を示している。

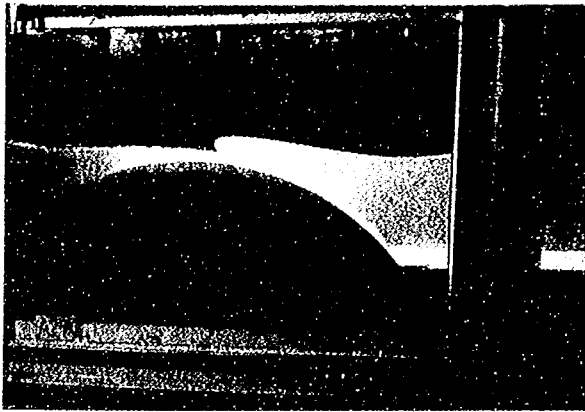


写真10.1 剛モデルの実験状況例

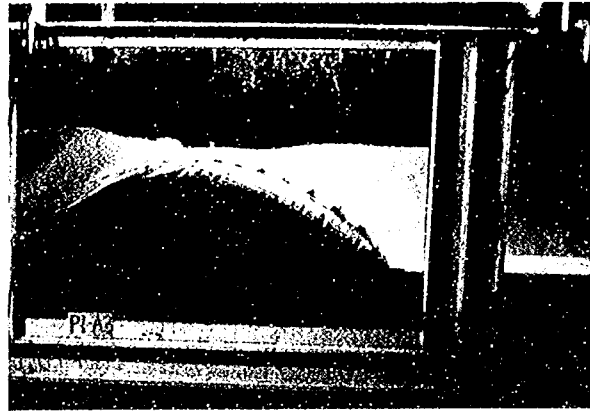


写真10.2 柔モデルの実験状況例

10.4 実験結果および考察

10.4.1 剛モデルの透過および反射特性

柔モデルの消波性能の良否は、剛モデルの消波特性と比較することによって正しく評価することができる。潜堤のような没水構造物の消波特性に最も大きな影響を及ぼすのは、砕波発生の有無を決める相対天端上水深 R/H_1 で、次いで砕波後の波高の減衰に関する相対天端幅 B'/L であることが報告^{1), 2), 3), 4)}されている。しかし、本研究で取扱っているような没水円弧状断面の構造物の波浪制御特性についてはまだ検討されていない。

そこで、図10.2に示したタイプA、タイプBおよびタイプCの三種類の形状の剛モデルを用いて、形状や相対天端上水深 R/H_1 、相対堤体幅 D/L の消波特性への影響を把握する。

図10.5は $R/H_1 = 1.00, 1.25$, $R/h = 0.10, 0.11$ のときの、また、図10.6は $R/H_1 = 1.13, 1.25$, $R/h = 0.20$ のときのそれぞれ断面形状の違いによる D/L と透過率 K_T との関係を示したものである。二つの図からわかるように、断面形状の違いによる透過率 K_T への影響はほとんどない。図10.5の $D/L > 0.8$ で、タイプBの K_T が他の2タイプよりも小さくなっているが、これは、タイプBの R/H_1 が他の2タイプのそれよりも小さいためと考えられる。また、 $R/h \approx 0.1$ の図10.5と $R/h = 0.2$ の図10.6を比較すると、模型ケース R.A2 と R.A1 および R.C2 と R.C1 とともにその透過特性にほとんど差はない。R.B2 と R.B1 の場合、 $D/L = 0.8 \sim 1.2$ の範囲で $R/h \approx 0.1$ の R.B2 のケースの方が $R/h = 0.2$ の R.B1 のケースよりも小さい K_T になっているが、これは R/H_1 の K_T への影響への検討で後述するように、R.B2 のケースの R/H_1 が R.B1 のケースのそれよりも小さいことに起因していると思われる。したがって、 R/H_1 が同じであれば、没水型構造物の通常の設置条件

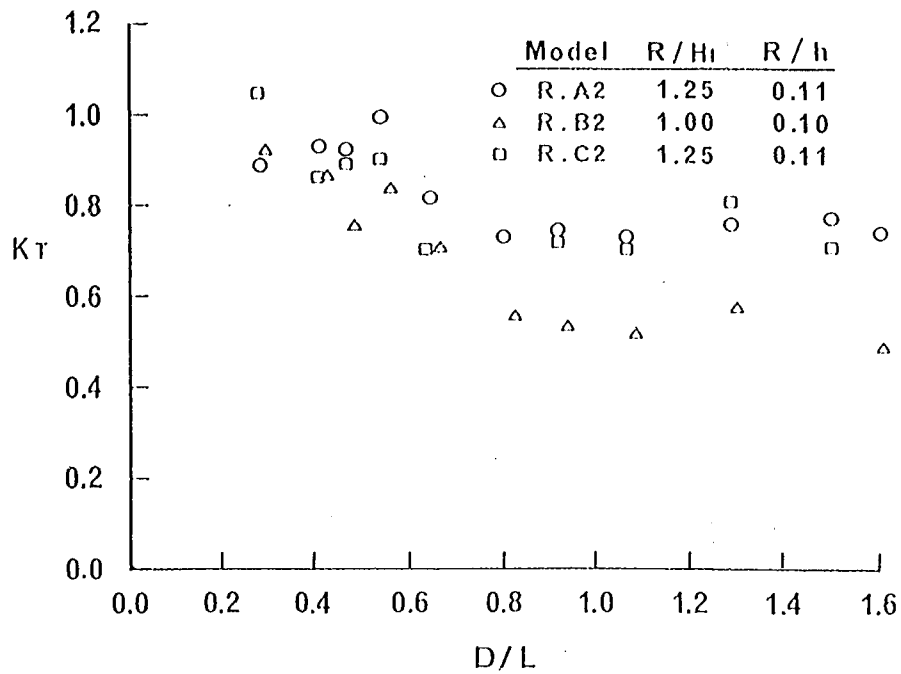


図10.5 剛モデルの形状が透過特性に及ぼす影響 ($H_1=4\text{cm}$)

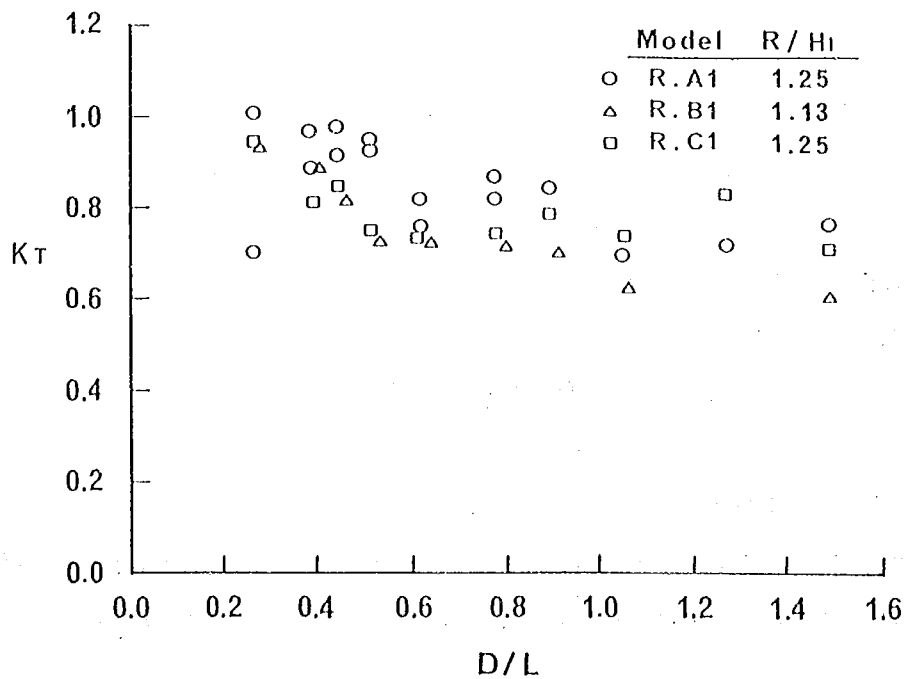


図10.6 剛モデルの形状が透過特性に及ぼす影響 ($R/h=0.2$, $H_1=8\text{cm}$)

である $R/h=0.1\sim0.2$ の範囲では、没水率 R/h の違いによる K_T への影響はほとんどないものと考えられる。

図10.7 は、タイプBの R/H_1 の違いによる K_T への影響を示したものである。すべての D/L で、 R/H_1 が小さくなると K_T も小さくなっており、従来から言われているように、 R/H_1 が没水型構造

物の消波性能を左右する最も重要なパラメータであることがわかる。また、 $R/H_I \leq 1.2$ では、 D/L の増加に伴って K_T が小さくなっており、 D/L も消波性能を左右する重要なパラメータであり、消波性能を上げるためには D/L を大きくしなければならないことがわかる。ところで、 $R/H_I = 2.3$ の場合、すべての D/L に対し $K_T > 1.0$ になっている。入射してきた波が浅瀬で砕波あるいは分裂すると入射波の周波数の2倍、3倍成分が現れることが知られている⁵⁾。波がエネルギーを失うことなく、高い周波数に移行すると、波高は増大する。例えば、周波数 f_1 、波高 H_1 の波がエネルギーを失うことなく $2f_1$ の波に完全に移行したとすると、その波高は $1.4H_1$ になる。

すなわち、 $R/H_I = 2.3$ の場合、著しい砕波を生じないのでエネルギー損失が小さく、波のエネルギーが元の周波数の2倍、3倍成分に移行することによって、波高が増加したものと考えられる。したがって、乱れによっていくつかの卓越周波数を有する波になるような場合、単純に透過率 K_T と反射率 K_R から波のエネルギー損失を求めるのではなく、周波数スペクトルを考慮した全エネルギーの変化から求めるべきである。

一方、図10.8はタイプBの反射率 K_R を示したもので、すべての R/H_I および D/L に対して $K_R \leq 0.2$ であり、目標値の $K_R \leq 0.5$ を十分満足している。他のタイプもほぼ同様な結果になっており、 K_R については全く問題がない。

なお、図では示さなかったが、 $R/H_I \geq 0.6$ の範囲では台形潜堤のようにフラットな天端をもつ一般的な潜堤と本実験で取扱った円弧状の潜堤の K_T に大きな差はない。ただし、 $R/H_I < 0.6$ では、フラットな天端をもつ潜堤の方が円弧状の潜堤よりも低い K_T となる。これは、円弧状の潜堤では潜堤上の最も浅い水深を天端上水深 R としていることによるものと思われる。

模型実験から得られた剛モデルの波浪制御特性の結果をまとめると、以下のとおりである。

① 本実験で取扱った $R/h = 0.1 \sim 0.2$ の範囲では、断面形状や没水率 R/h の違いによる透過率 K_T

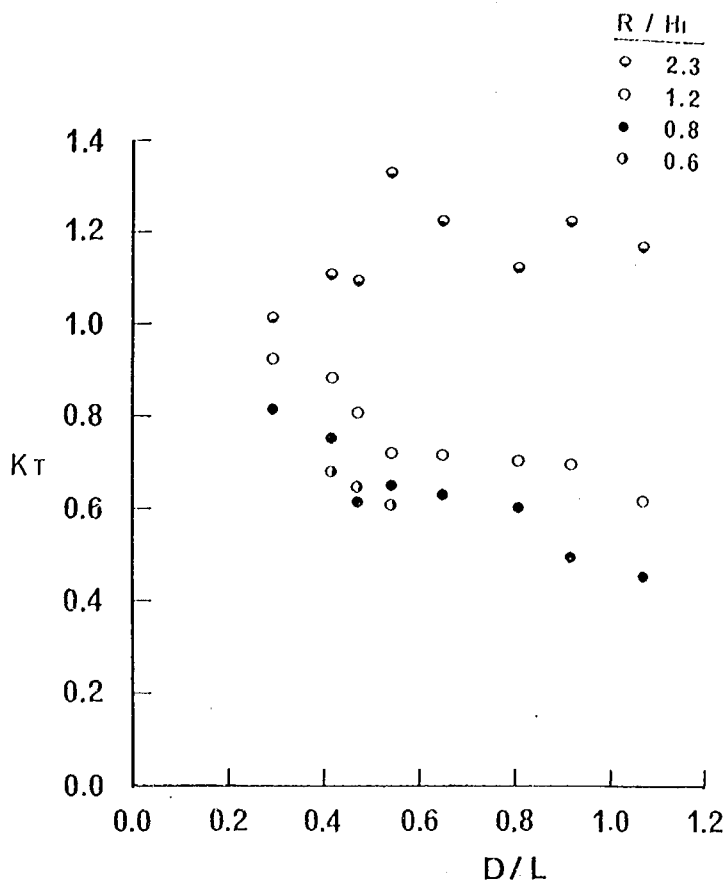


図10.7 剛モデルの R/H_I が透過特性に及ぼす影響
(剛モデル R.B1)

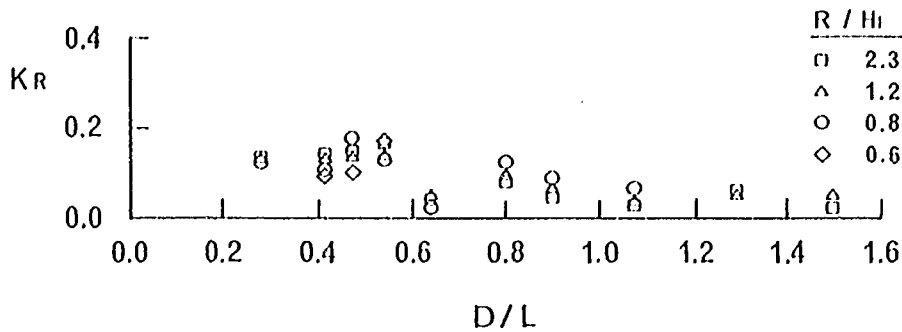


図10.8 R/H_1 が剛モデルの反射特性に及ぼす影響 (剛ケース R. B1)

の違いはほとんどない。また、フラットな天端をもつ一般的な潜堤と本実験で扱ったような円弧状断面の潜堤も断面形状の違いによる K_T への影響はあまり大きくないと考えてよい。

- ② K_T に最も大きな影響を及ぼすのは、相対天端上水深 R/H_1 であり、 $K_T \leq 0.6$ を得るためには、 $R/H_1 \leq 1.0$ にする必要がある。
- ③ 相対堤体幅 D/L も R/H_1 が小さい場合 (たとえば、 $R/H_1 \leq 1.2$) には、 K_T に大きな影響を及ぼし、 $K_T \leq 0.6$ を得るためには $D/L \geq 0.6 \sim 0.8$ とする必要がある。この D/L を相対天端幅 B'/L に換算すると、 $B'/L = 0.24 \sim 0.32$ となる。
- ④ 反射率 K_R は構造物の形状や R/H_1 に関係なく概ね 0.2 以下であり、實際上問題にならないと考えてよい。

10.4.2 柔モデルの透過および反射特性

柔モデルが剛モデルと異なる点は、波によって構造物の形状が変形し、運動することである。本実験では、この柔モデルの柔らかさ・変形し易さを構造物の中に過剰に加えた付加水圧 Δp と、膜材の弾性定数 E の二つのパラメータで表した。

フレキシブルマウンドは、袋体の中に注入する水の量、すなわち Δp によって柔らかさを調整することができる。膜に伸びがなければ、 Δp を無限大にした状態が剛モデルに相当する。

図10.9は、付加水圧の違いによる透過特性への影響を把握するため、剛モデルAと柔モデルAの無次元化された付加水圧 $\Delta p / \rho gh$ の異なる ($\Delta p / \rho gh = 0.008$, 0.046 および 0.098) 3 ケースを比較したものである。ただし、剛モデルAは $R/h = 0.2$, $R/H_1 = 0.83$ であり、柔モデルAは $R/h = 0.2 \sim 0.26$, $R/H_1 = 1.0, 1.1$ である。

同様に、図10.10は図10.9の場合に比べて R/H_1 のみが大きい場合の透過特性を示したものである。すでに示したように、従来の没水型構造物は R/H_1 の小さいほど透過率 K_T も小さくなるが、図10.9および図10.10ともに剛モデルの R/H_1 が柔モデルのそれよりも若干小さいにもかかわらず、 D/L の全範囲に対して柔モデルのケースの方が剛モデルのケースよりも小さい K_T になっている。さらに、柔モデルの場合、著しい砕波を伴う $R/H_1 = 1.0$ はもとより、剛モデルでは全く消波効果の

得られない著しい砕波を伴わない
 $R/H_1=3.0$ でも目標の透過率 $K_T=$
 $0.4\sim0.6$ を得られることがわかる。
 したがって、柔モデルの特長は、
 相対堤体幅 D/L が小さい場合や、
 相対天端上水深 R/H_1 が大きい場
 合でも優れた消波性能を得ること
 ができるという点にある。

柔モデルは付加水圧 Δp によって
 消波特性がかなり異なっており、
 Δp がフレキシブルマウンドの消波
 性能を左右する重要なパラメータ
 であることがわかったが、 Δp と
 K_T との因果関係(定量的評価)は

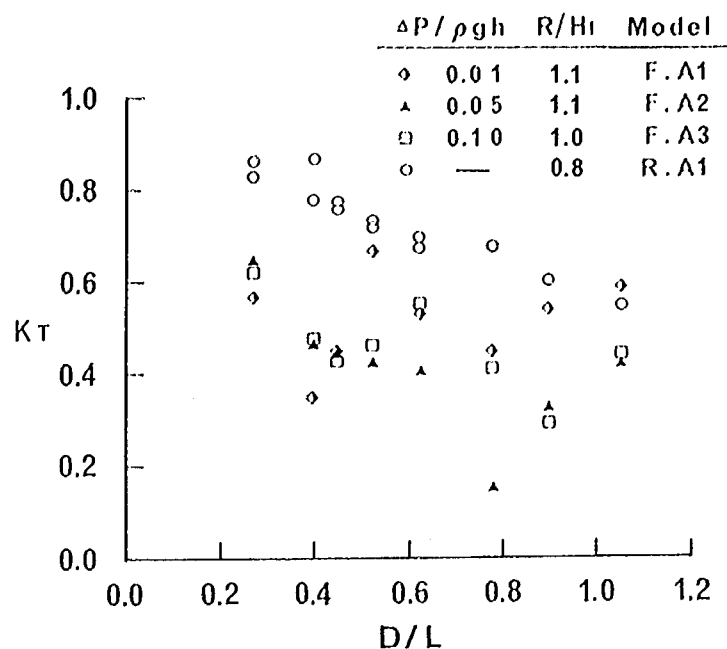


図10.9 付加水圧が透過特性に及ぼす影響
 $(R/H_1=0.8\sim1.1)$

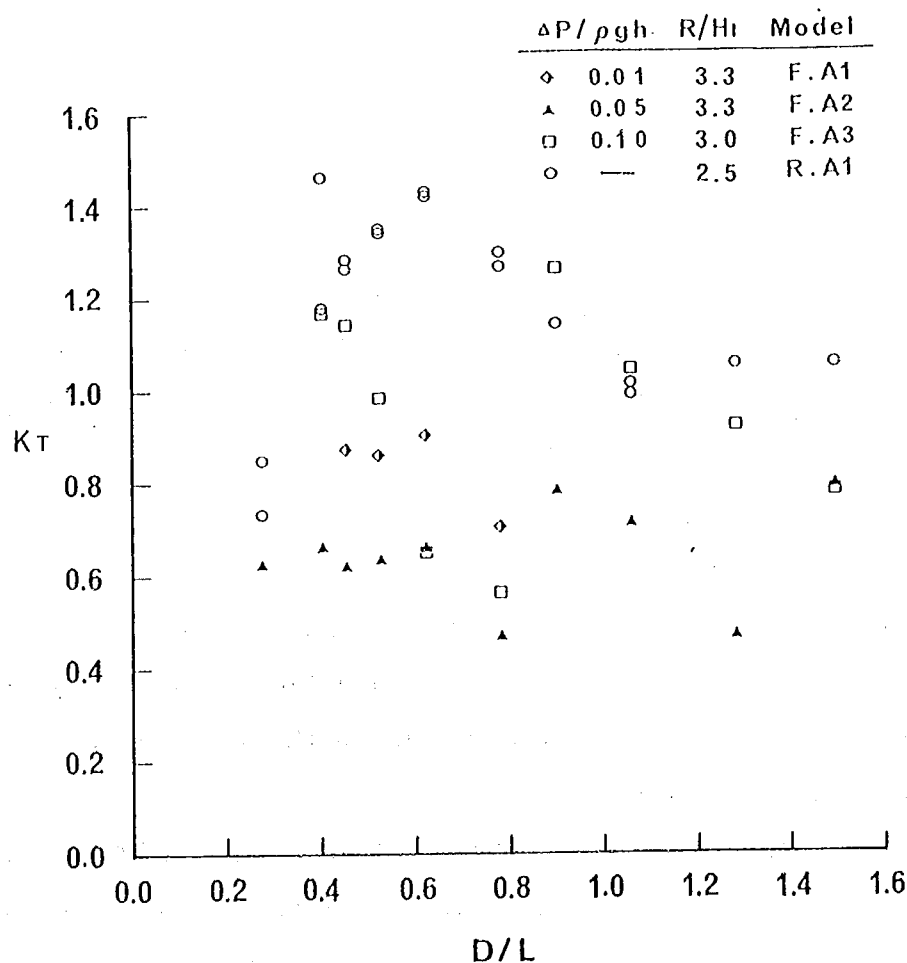


図10.10 付加水圧が透過特性に及ぼす影響 $(R/H_1=2.5\sim3.3)$

まだ明らかではない。しかし、 Δp が大き過ぎると剛モデルと同じような特性になり、逆に、 Δp が小さ過ぎるとフレキシブルマウンドが周囲の水粒子とほとんど同じ動きになるので消波性能は低下すると予測される。したがって、図10.9でも3種類の Δp のうちの中間の $\Delta p/\rho gh=0.046$ のとき低い透過率が得られているように、フレキシブルマウンドの形状・寸法や波浪条件によって最も高い消波効果が得られる付加水圧 Δp があるものと思われる。

図10.11および図10.12は、それぞれ図10.9および図10.10と同じ実験条件の反射率を示したものである。反射率 K_R は透過率の場合とは逆に、柔モデルの方が剛モデルよりも大きくなっている。しかし、目標の $K_R \leq 0.5$ は満足してい

る。

図10.13は、膜材の剛性の異なる柔モデルA3、B2およびC1の透過特性を示したものである。ただし、 $R/H_I = 0.92 \sim 1.0$ 、 $R/h = 0.15 \sim 0.24$ 、 $\Delta p/\rho gh = 0.098 \sim 0.102$ である。図10.13から判断すると、剛性の大きい方が K_T を小さくすることができるように思われるが、小さなモデルを用いた予備実験では剛性の小さい場合に小さい K_T が得られており、結論を出すにはもう少し研究が必要である。いずれにしても柔モデル

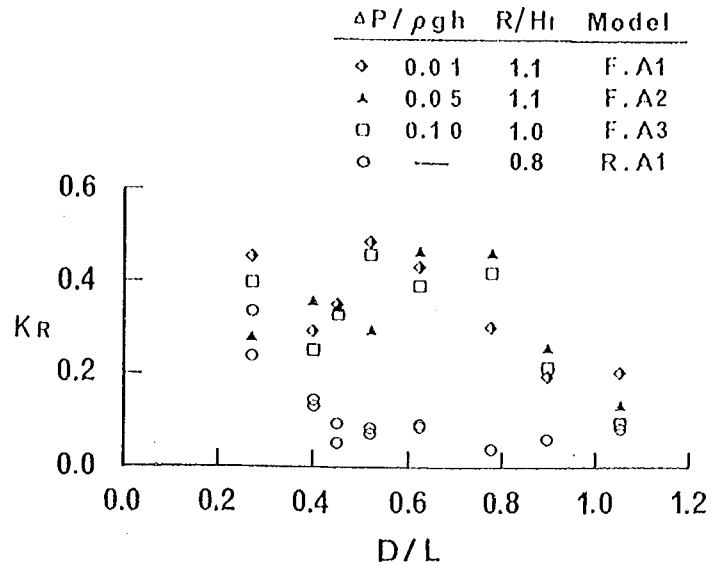


図10.11 付加水圧が反射特性に及ぼす影響

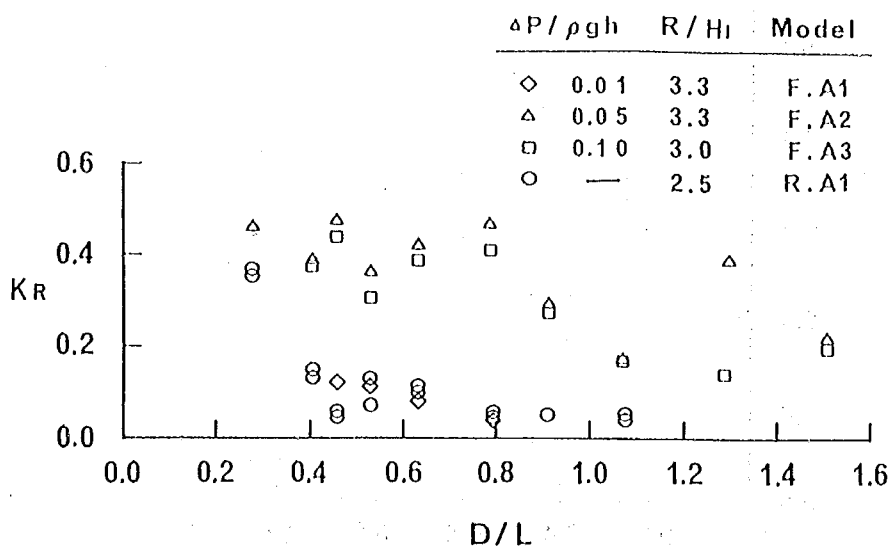


図10.12 付加水圧が反射特性に及ぼす影響

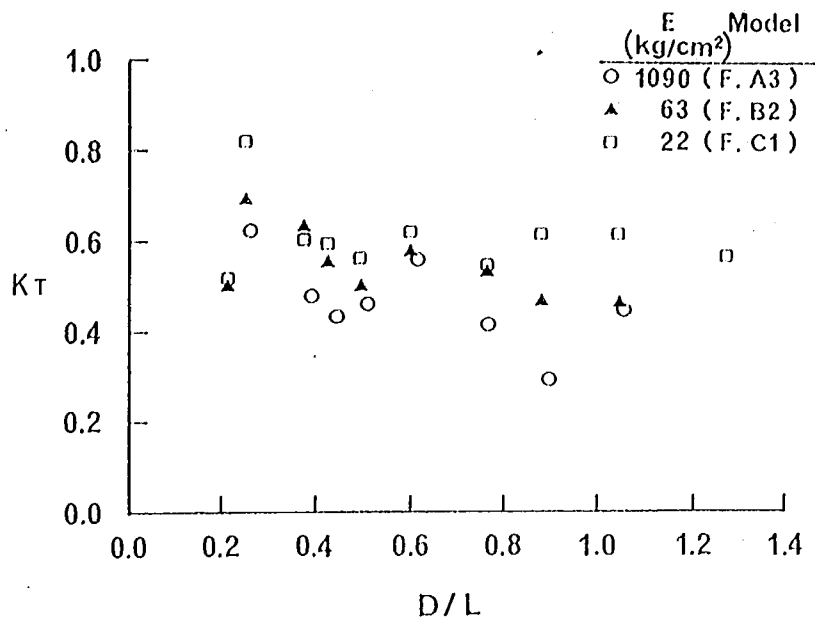


図10.13 膜材の剛性が透過特性に及ぼす影響

の場合、構造物自身が運動することにより“radiation wave”をつくりだし、これが水理特性に大きく影響しているものと思われる。したがって、膜材の剛性と K_T を直接結びつけるよりも、膜材の剛性や付加水圧がフレキシブルマウンドの挙動に及ぼす影響、そして、フレキシブルマウンドの挙動とその挙動により発生する“radiation wave”との関係を明らかにすることが重要であると考えられる。

図10.14および図10.15は、 R/H_I をパラメータとして柔モデルB1の透過および反射特性を示した

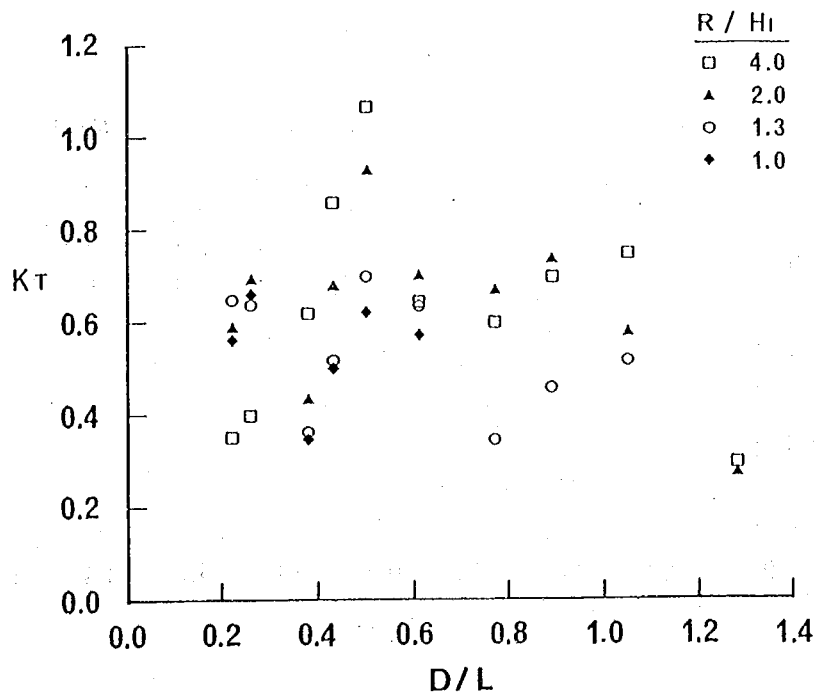


図10.14 R/H_I が柔モデルの透過特性に及ぼす影響 (F. B1)

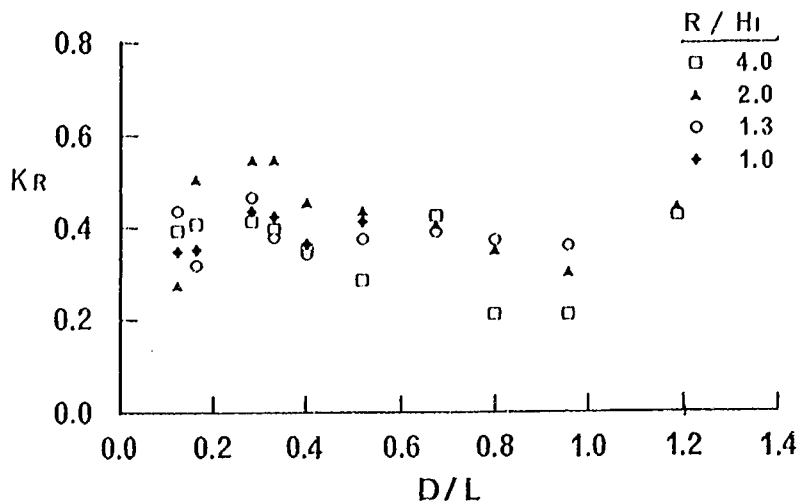


図1Q.15 R/H_I が柔モデルの反射特性に及ぼす影響 (F. B1)

ものである。ただし、 $R/h=0.29$ 、 $\Delta p/\rho gh=0.042$ である。柔モデルの K_T は、 $D/L=0.4\sim0.6$ の範囲では R/H_I の減少とともに K_T が小さくなっているが、 $D/L<0.4$ および $D/L>0.6$ では R/H_I に依存していない。また、すでに述べたように、剛モデルの場合 D/L の増加に伴ってその K_T が小さくなったが、柔モデルの K_T は D/L によって複雑に変わっており、そこに法則性は認められない。これは、柔モデルの場合、構造物の動きにより発生する radiation wave の波高、周期および位相差が D/L によって異なるためと思われる。

すでに示したように、剛モデルの場合、 $R/H_I \geq 2.0$ では消波機能は全く期待できなかったが、柔モデルの場合、フレキシブルマウンドの質量、付加水圧や膜材の剛性、相対堤体幅 D/L などを調節し発生する radiation wave をコントロールすることにより、 $R/H_I=4.0$ でも $K_T \leq 0.4$ を得ることが可能である。また、剛モデルの場合、 $K_T \leq 0.6$ を得るためには $D/L \geq 0.6\sim0.8$ が必要であったが、柔モデルの場合、 D/L にはあまり依存せず、 $D/L=0.2\sim0.4$ でも目標の K_T を得ることが可能である。

一方、反射率は $K_R=0.22\sim0.55$ で剛モデルに比べて大きくなっているが、目標の $K_R \leq 0.5$ は達している。実際に使用する場合には、 K_T と K_R のバランスがよくなるようにフレキシブルマウンドを設計することが重要である。

模型実験から得られた柔モデル(フレキシブルマウンド)の波浪制御特性の結果をまとめると、以下のとおりである。

- ① 相対天端上水深 R/H_I の違いによる波の透過率 K_T への影響は小さく、 $R/H_I=4.0$ でも $K_T \leq 0.4$ を得ることが可能である。なお、剛モデルの場合、 $R/H_I \geq 2.0$ では同一条件を満足することは不可能であった。
- ② 相対堤体幅 D/L によって K_T は大きく変化するが、剛モデルのように $D/L \geq 0.6\sim0.8$ と大きくする必要はなく、 $D/L=0.2\sim0.4$ で $K_T \leq 0.4$ を得ることが可能である。

- ③ フレキシブルマウンドによる消波原理は、構造物の動きによって発生する“radiation wave”との干渉効果によるものと考えられる。この radiation wave の発生には、フレキシブルマウンドの柔らかさ（付加水圧 Δp 、膜材の弾性定数 E ）や質量が重要なパラメータであると思われる。
- ④ 反射率 K_R は剛モデルの場合よりも大きくなるが、目標の $K_R \leq 0.5$ は満足させることができる。

10.5 あとがき

潜堤に代表される従来の没水型構造物は、相対天端上水深 R/H_I を小さくし、相対天端幅 B'/L （または、相対堤体幅 D/L ）を大きくし、すなわち、堤体の断面寸法を大きくしなければ優れた消波性能を得ることができなかった。ここに提案した『フレキシブルマウンド』は、 R/H_I を大きく、 D/L を小さくできるので、従来の潜堤の $1/5 \sim 1/10$ の断面でも波浪を制御することが可能であると考えられる。フレキシブルマウンドは従来の没水型構造物とは材料、構造形式および消波原理が全く異なるので、実現化にあたっては、今後の以下のような研究課題を検討する必要がある。

（消波のメカニズムに関する課題）

- ① フレキシブルマウンドの動きに伴って発生する radiation wave と、波浪条件、フレキシブルマウンドの材料や構造条件などの要因との関係を定量的に把握する。
- ② radiation wave の波高、周期および位相と、透過率 K_T および反射率 K_R との関係を定量的に把握する。
- ③ フレキシブルマウンドの動きに伴うエネルギーの減衰機構と、エネルギーの減衰が波の透過および反射特性に及ぼす影響を把握する。

（海浜および地形変化に関する課題）

- ① フレキシブルマウンド（群）の設置に伴う人工礁の前面および開口部の洗掘に対する検討を模型実験等により行う。
- ② フレキシブルマウンド（群）の設置に伴う人工礁の周辺および背後域の海浜変形に対する検討を行う。

（使用材料および施工法に関する課題）

- ① フレキシブルマウンドに作用する波圧、波力を把握し、フレキシブルマウンドに用いる膜材料、製作方法および固定方法を検討する。
- ② 特に、固定方法については、波力に対する安定性実験等を行いその妥当性を検討する。
- ③ 膜材料の疲労などの耐久性を検討する。

参考文献

- 1) 永井莊七郎, 小田一紀, 倉田克彦: 大水深緩面捨石潜堤に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 409~414, 1975.
- 2) 永井莊七郎, 倉田克彦, 長谷川恵一: 潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 303~307, 1977.
- 3) 田中則男: 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152~157, 1976.
- 4) 堀川清司, 小森修蔵: 潜堤による風波の減衰機構について, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 340~349, 1968.
- 5) 例えば, 前出 3)

第11章 斜板消波潜堤に関する研究

建設省土木研究所海岸研究室 室 長 宇多 高明

研究員 村井 禎美

大成建設(株)技術本部技術研究所 茗ヶ原義彦

田中 剛

勝井 秀博

中塚 健司

1.1.1 目 的

海域の静穏化を図るために、種々の型式の消波構造物が提案されている。その中でも砕波による消波メカニズムを有する斜板消波潜堤は、消波性能に優れ、かつ景観を損うことのない有効な消波構造と考えられる。

本研究は、この斜板消波潜堤に関して、波の反射および透過に関する水理模型実験を行い、経済的かつ有効な消波性能を有する構造型式を開発することを目的とする。開発に際して、消波性能の目標値は、透過率 $K_T \leq 0.6$ 、反射率 $K_R \leq 0.5$ に設定した。

1.1.2 構造形式概要

水理実験の対象とした構造は、図1.1.1～図1.1.3に示す基礎構造上に斜板を設置した構造(P型)、没水斜面ケーソン構造(C1型)、粗度付没水斜面ケーソン構造(C2型)の3種類である。以下にそれぞれの構造の特徴を記述する。

(1) 基本形(図1.1.1, P型)

この構造は、基礎構造上に板を波の進行方向に対し前方を深く、後方を浅く傾斜させて設置しており、入射波エネルギーを水面付近に集中させ、砕波を促進して消波を行う。

(2) 改良Ⅰ型(図1.1.2, C1型)

没水斜面ケーソン構造は、斜板の下部を不透過とすることにより反射率を大きくし、透過率を低減させることをねらいとしている。

(3) 改良Ⅱ型(図1.1.3, C2型)

粗度付没水斜面ケーソン構造は、斜板上に栈粗度を複数配列することにより砕波および水の乱れを促進し、また斜板後部と堤体前面に開口部を設けて水塊の落ち込みを防止するとともに波の位相差消波を図ることにより透過率をさらに低減させることをねらいとしている。

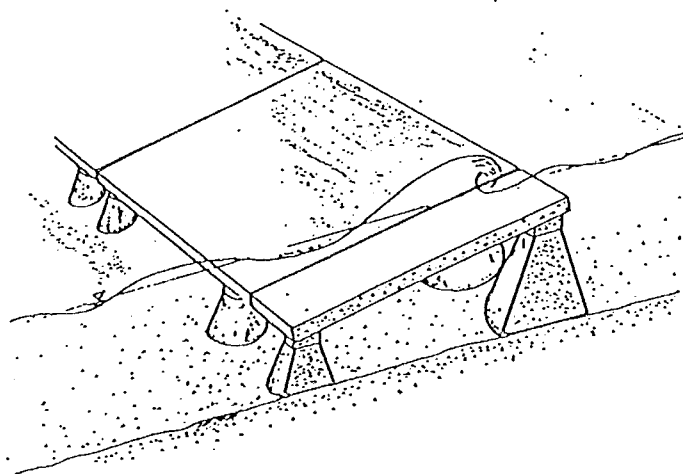


図 1.1.1 基本型(P型)概念図

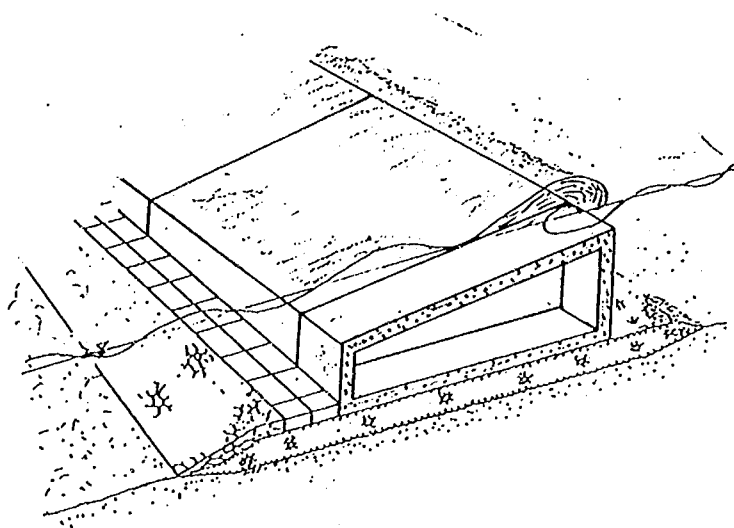


図11.2 改良Ⅰ型（C1型）概念図

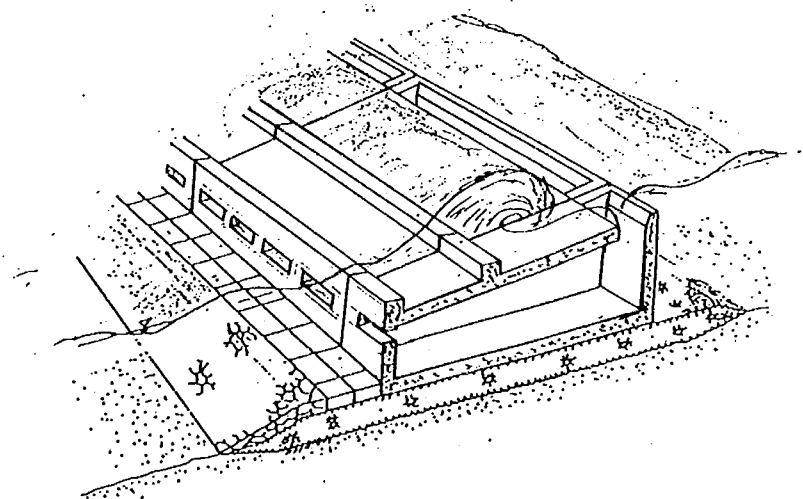


図11.3 改良Ⅱ型（C2型）概念図

11.3 実験方法

11.3.1 実験装置

実験は、大成建設㈱技術研究所の二次元造波水路を用いた（図11.4）。水路は全長47.0 m，幅0.8 m，高さ1.6 mで，水路端には，油圧式不規則造波装置が取り付けられている。水路床は，造波板から8 mの地点まで水平床で，そこから2 mを勾配1/20，9 mを勾配1/50の斜面とし，さらにこれより先21 mを水平床とした。また，水路端には消波装置を設けている。堤体模型の設置位置は，造波板から31 mの地点であり，水路は片面ガラス張りで側面からの観察が可能である。

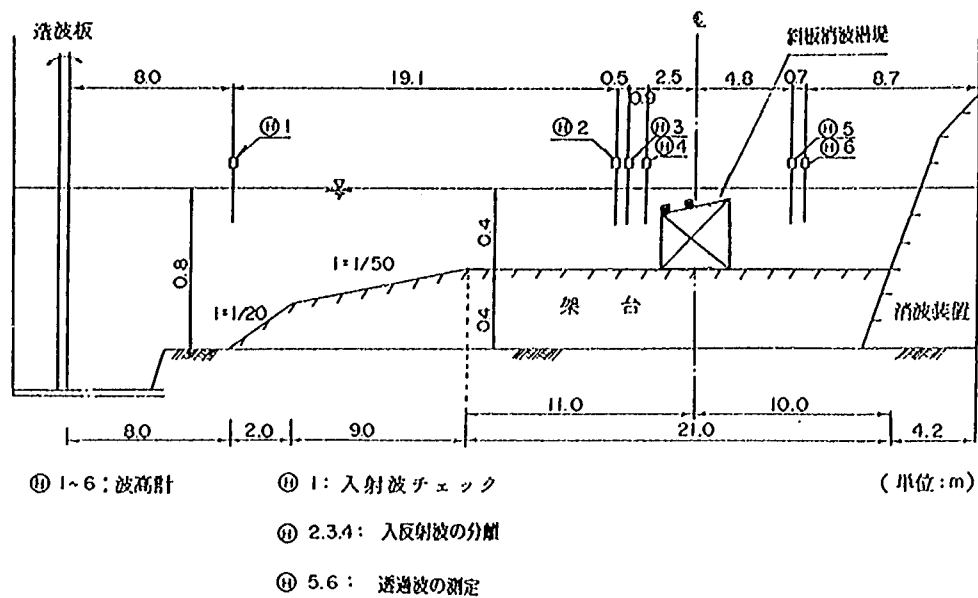


図11.4 実験装置

11.3.2 水理条件

模型の縮尺は1/25であり、現地と模型との対比を表11.1に示す。消波性能の検討に用いた実験波はすべて規則波であり、表11.2に示す15波浪（土研提示11波+4波）を選定した。ただし、模型形状によって、不必要と思われる波浪条件は省いた。

表11.1 実物と模型との対比

諸元	実物	模型
水深	10m	40cm
波高	1m~4m	4cm~16cm
周期	6sec~14sec	1.2sec~2.8sec

表11.2 波浪条件

周期 T (sec)	波高 H (cm)	波長 L (cm)	波形勾配 H/L
1.2	4	194	0.021
"	8	"	0.041
"	12	"	0.062
"	16	"	0.082
1.4	8	239	0.033
"	16	"	0.067
1.6	12	283	0.042
"	16	"	0.057
2.0	4	369	0.011
"	8	"	0.022
"	12	"	0.033
2.8	4	535	0.007
"	8	"	0.015
"	12	"	0.022
"	16	"	0.030

11.3.3 実験ケース

実験ケースの一覧を表11.3に示す。各型式の実験ケースの内容は、以下の通りである。

(1) 基本型 (P型)

斜板の空隙率(ϵ)、勾配(i_B)、没水深(R)、堤体幅(B)を変化させた14ケースを設定した。この実験では、斜板の4個のパラメータの組み合わせを種々変え、その中から、消波性能の高い形状を選ぶことを目的とする。ただし実験に用いた模型では基礎は無視して、斜板のみでモデル化している。

(2) 改良I型 (C1型)

(1)で決定された4個のパラメータは、 $\epsilon = 0$ 、 $i_B = 1/5$ 、 $R/h = 0.1$ 、 $B/h = 2.0$ となった。しかし、 $T \geq 2.0$ secの長周期の波に対する透過率 K_T は、目標値 $K_T \leq 0.6$ を満足せず、一方、反射率 K_R は実験に使用した全ての波に対して、目標値 $K_R \leq 0.5$ より十分低い値が得られた。したがって、反射率を高めることによって全体の消波性能の向上を図る目的で斜板の下部を不透過とした。さらに $i_B = 1/10$ として透過率をさらに低減できるかどうかを検討した。

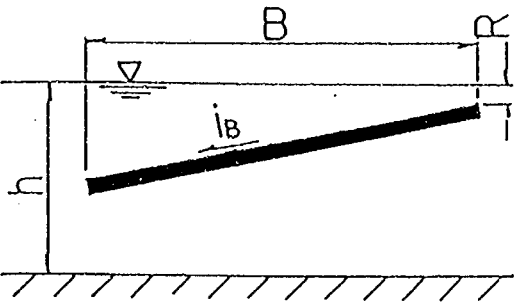
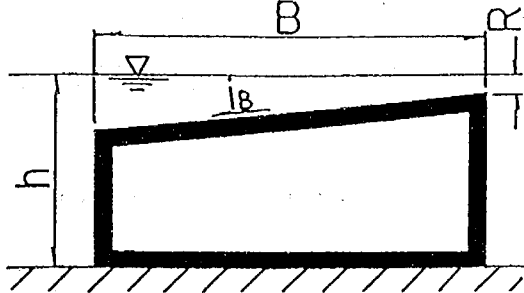
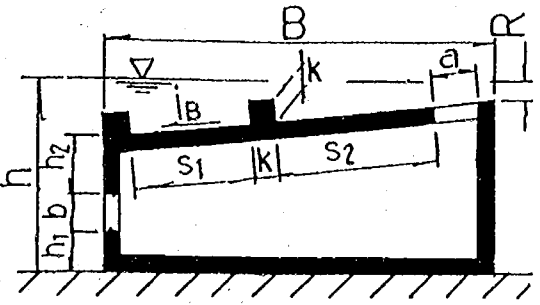
(3) 改良II型 (C2型)

(2)のC1型でも $T \geq 2.0$ secの長周期の波に対しては、透過率の目標を達成できなかった。そこで、砕波および水の乱れを促進させる目的で斜板上に棧粗度を配置し、また水塊の落ち込みを防止するとともに波の位相差消波を図る目的で斜板後部と堤体前面に開口部を設けた。

11.3.4 計測方法

入射波高 H_I は、模型の沖側2.5mの位置に波高計を置いて、模型を設置しない状況で設定した(図11.4)。透過波高 H_T は、波高計⑤、⑥から読み取り平均を取った。反射率 K_R は、波高計②～④から得られたデータを、合田らの方法¹⁾により求めた。透過率 K_T は、 H_T/H_I より算出した。

表11 3 実験ケース一覧表

	実験 ケース	空隙率 ε	勾配 i_B	没水比 R/h	相対堤体幅 B/h	構造モデル
基 本 型	P 01	0	0.0	0.0	2.0	 (註) 1. 開口率 ε は斜板に 円形孔を設ける。 ・ 4つのパラメータ〔B, R, ε, i_B〕の組み 合せから、消波性能に最適な形状を深す。
	P 02			0.1	2.0	
	P 03		1/5	0.0	2.0	
	P 04				3.0	
	P 05			0.1	2.0	
	P 06				3.0	
	P 07			0.2	2.0	
	P 08				3.0	
	P 09	0.05	3/10	0.0	2.0	
	P 10			0.1	2.0	
	P 11		1/5	0.0	2.0	
	P 12			0.1	2.0	
	P 13	0.20	1/5	0.0	2.0	
	P 14			0.1	2.0	
改 良 型	C 1	0	1/10	0.1	2.0	
	C 2	0	1/10	0.1	2.0	 $a/h=0.225$ $b/h=0.125$ $h_1/h=0.225$ $h_2/h=0.35$ $k/h=0.1125$ $S_1/h=0.655$ $S_2/h=0.8675$

11.4 透過および反射特性に関する実験結果

11.4.1 基本型 (P型)

この構造の実験は、斜板の4個のパラメータの各種組み合わせから、消波性能の高い形状を選択するために行った。基本型では、 R/h を0.0, 0.1と変えたとき、いずれの形状でも反射率 K_R が0.4程度以下で目標値を満足したので(図11.5, 11.6参照), パラメータの選定は、 K_T にのみ着目して行った。

以下に各パラメータの選定過程について述べる。

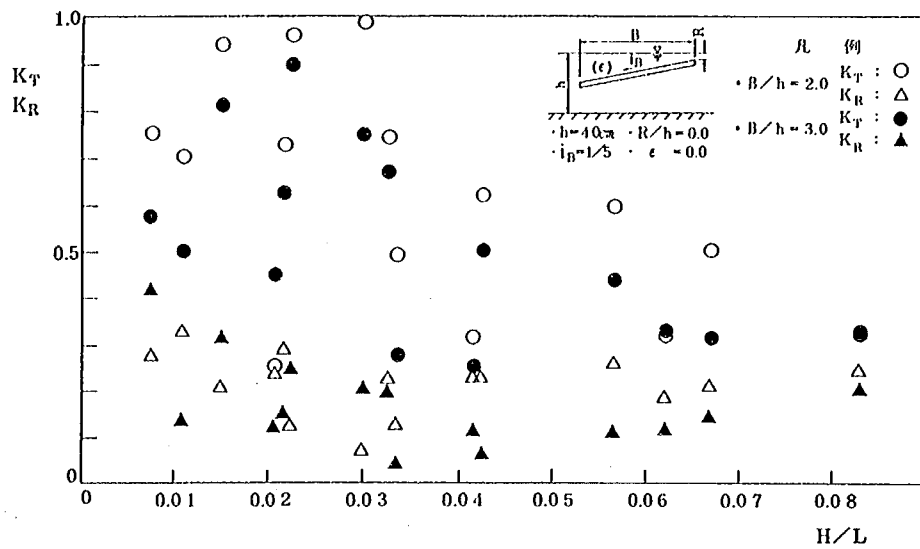


図11.5 $B/h=2.0$ と 3.0 の場合の K_T, K_R の比較 ($R/h=0.0$)

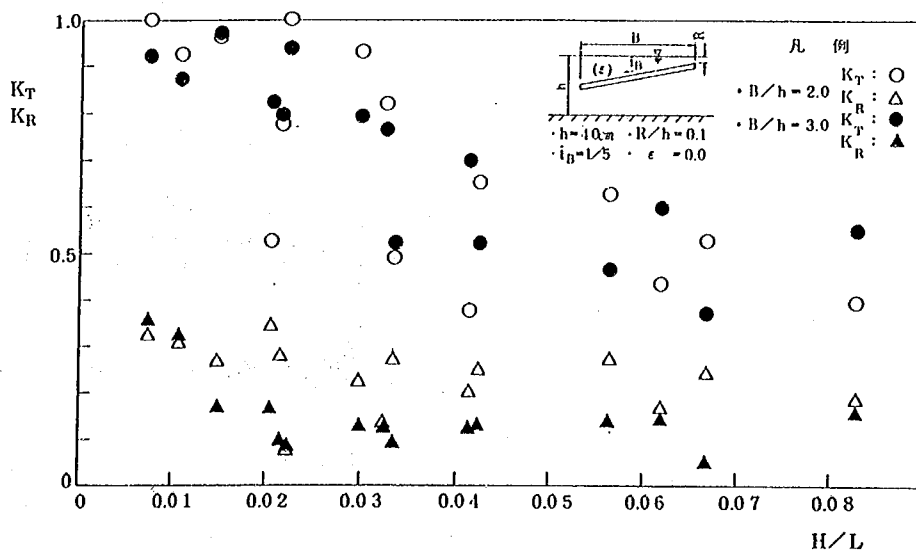


図11.6 $B/h=2.0$ と 3.0 の場合の K_T, K_R の比較 ($R/h=0.1$)

(1) 相対堤体幅 $B/h=2.0$ と 3.0 の比較

図11.5, 11.6に $B/h=2.0$ と 3.0 での透過率 K_T と反射率 K_R を、横軸に波形勾配 H/L をとって比較した。ただし、入射波高は $H=4, 8, 12, 16\text{cm}$ 、斜板の勾配は $i_B=1/5$ 、空隙率は $\varepsilon=0$ 、没水比は $R/h=0.0, 0.1$ とした。 $R/h=0.0$ では(図11.5), $B/h=2.0$ に比べ $B/h=3.0$ にすると、 K_T は、 0.1 程度減少するが、 $R/h=0.1$ では(図11.6), $B/h=3.0$ に広げても、 K_T の減少の度合は小さい。以上から、より経済的な断面と考えられる $B/h=2.0$ を選定した。

(2) 没水比の影響

$B/h=2.0$, $i_B=1/5$, $\varepsilon=0$ の場合について、没水比を $R/h=0.0, 0.1, 0.2$ と変化させた時の透過率 K_T と反射率 K_R を、横軸に R/h をとって比較したのが図11.7である。実験では、入射波高を $H=4, 8, 12, 16\text{cm}$ と変化させたが、ここでは R/h の効果が良く現われている $H=8\text{cm}$ のケースのみを示す。図によると、 $T \geq 2.0\text{sec}$ の長周期の波に対しては、 K_T は大きく、また R/h による K_T の変化は小さい。一方、 $T \leq 1.4\text{sec}$ の短周期の波に対しては、没水比の影響を受ける。 $R/h=0.2$ の場合、周期 $T \leq 1.4\text{sec}$ の波では K_T は約 0.75 と大きい。 $R/h=0.1$ の場合、 $K_T \leq 0.5$ となる。

以上から、目標とする透過率を満足するために、 $R/h \leq 0.1$ とした。

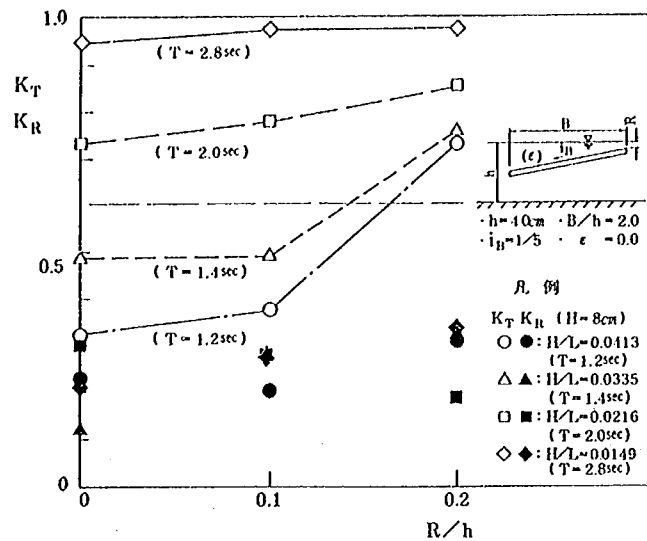


図11.7 R/h と K_T, K_R の関係 ($H=8\text{cm}$)

(3) 空隙率 ε の影響

一般に、水平板の空隙は、透過率よりも反射率の低減に寄与すると言われている。しかし、本実験では、砕波を促進するために板が傾斜していることから、その斜板の傾斜と空隙の相互作用による新たな消波メカニズムの発生を期待して、空隙率 ε の影響について検討した。 $B/h=2.0$, $i_B=1/5$, $R/h=0.0$ の場合について、空隙率を $\varepsilon=0, 0.05, 0.20$ と変化させた時の透過率 K_T と反射率 K_R を、横軸に空隙率 ε をとって比較したのが図11.8である。 $\varepsilon=0.20$

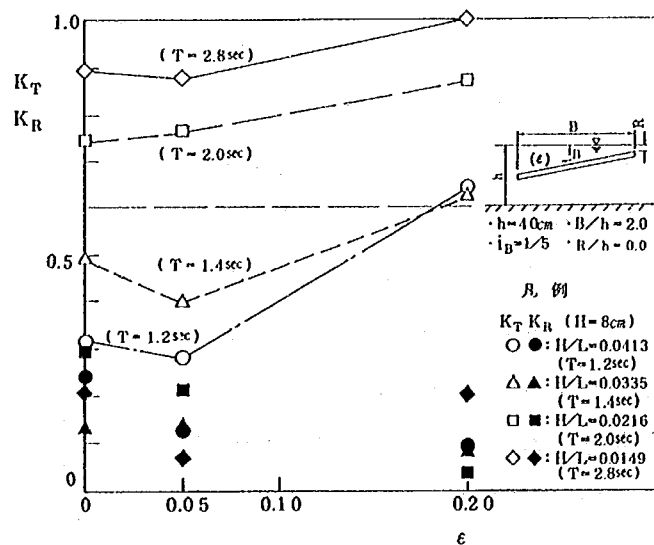


図11.8 空隙率 ε と K_T, K_R の関係 ($H=8\text{cm}$)

のとき、 $T \leq 1.4 \text{ sec}$ の短周期の波でも $K_T = 0.65$ 程度となり、波はほとんど通過してしまう。 $\epsilon = 0.05$ と $\epsilon = 0$ の比較においても、 $T \leq 1.4 \text{ sec}$ の短周期の波では空隙の効果が見られるが、 $T \geq 2.0 \text{ sec}$ の長周期の波では空隙の効果がない。

以上から、斜板の傾斜と空隙の相互作用による消波効果はほとんど見られないことがわかった。したがって、 $\epsilon = 0$ を条件として選んだ。

(4) 勾配 i_B の影響

$B/h = 2.0$ 、 $\epsilon = 0.0$ 、 $R/h = 0.0, 0.1$ の場合について、 i_B を 0, 1/5, 3/10 と変化させた時の透過率 K_T と反射率 K_R を、横軸に勾配 i_B をとって比較したのが図 11.9, 11.10 である。 K_T, K_R に関して以下の事が言える。 $i_B = 3/10$ と 1/5 の比較では、 K_T に大きな違いはない。しかし、 $i_B = 1/5$ と 0.0 の比較では、没水比 R/h により違いがある。 $R/h = 0.0$ の場合 (図 11.9), $T \geq 2.0 \text{ sec}$ のとき K_T は $i_B = 1/5$ の方が $i_B = 0.0$ より 0.1 程度小さいが、 $T \leq 1.4 \text{ sec}$ では K_T に大きな違いはない。 $i_B = 1/5$ の K_R は $K_R \leq 0.3$ であるのに対し、 $i_B = 0.0$ の K_R は 0.6~0.8 と大きくなる。 $R/h = 0.1$ の場合 (図 11.10), $T \geq 2.0 \text{ sec}$ のとき K_T は $i_B = 0.0$ の方が $i_B = 1/5$ より 0.1~0.2 程度小さいが、 $T \leq 1.4 \text{ sec}$ では K_T に大きな違いがない。 $i_B = 1/5$ の K_R は $K_R \leq 0.3$ であるのに対し、 $i_B = 0.0$ の K_R は $T = 2.8 \text{ sec}$ を除いて $K_R \approx 0.5$ と大きくなる。

$R/h = 0.0$ と 0.1 で $i_B = 1/5$ と 0.0 における K_T の特性の違いをまとめると次のようである。斜板の場合、 R/h が大きくなると K_T も大きくなる。一方、水平板の場合、 $T \leq 1.4 \text{ sec}$ で斜板と同様の傾向を示すが、 $T \geq 2.0 \text{ sec}$ では R/h が大きくなると K_T が小さくなる。すなわち、水平板では入射波周期によって $R/h = 0.0$ より 0.1 の方が K_T が小さくなる場合が生ずる。これ

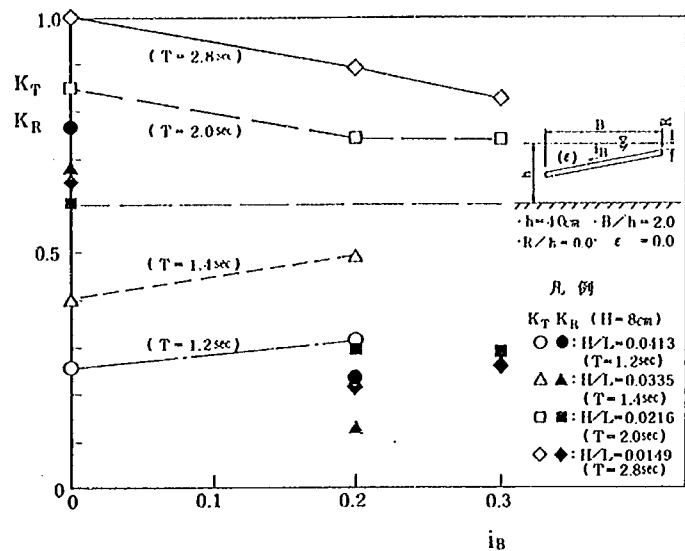


図 11.9 i_B と K_T, K_R の関係 ($R/h = 0.0$, $H = 8 \text{ cm}$)

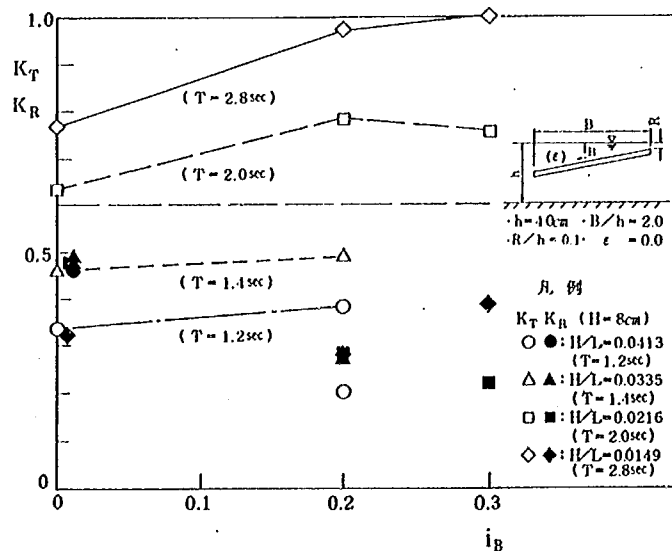


図 11.10 i_B と K_T, K_R の関係 ($R/h = 0.1$, $H = 8 \text{ cm}$)

は、 $R/h=0.0$ では、入射波周期によって板上で砕波が起これにくくなり、砕波によるエネルギー損失が期待できなくなるためであると考えられる。

次に、エネルギー損失の違いを明確にするために、 $i_B=0.0$ と $1/5$ について縦軸にエネルギー損失率 K_L^2 ($K_L^2=1-K_R^2-K_T^2$) を、横軸に B/L をとって比較したのが図11.11, 11.12 である。
 $R/h=0.0$ の場合 (図11.11), $i_B=1/5$ の K_L^2 は $i_B=0.0$ の K_L^2 の2倍以上の値を示す。また、 $R/h=0.1$ の場合 (図11.12), K_L^2 は $T \geq 2.0$ sec の長周期の波で $i_B=1/5$ の方が $i_B=0.0$ より0.2程度小さいが、 $T \leq 1.4$ sec の短周期の波では、 $i_B=1/5$ の方が $i_B=0.0$ より0.1~0.2程度大きくなる。以上より、 $i_B=1/5$ の方が $i_B=0.0$ より入射波周期の広い範囲で K_L^2 が大きく、総合的に見て消波性能が高いといえる。したがって、 $i_B=1/5$ を選択した。

(5) 選定されたパラメータ

(1)~(4)の検討から、基本型の斜板型消波潜堤の形状は、
 相対堤体幅 $B/h=2.0$, 没水比 $R/h=0.1$, 空隙率 $\epsilon=0.0$, 勾配 $i_B=1/5$ とした。この形状は表11.3のケースP05である。
 以下これをP型と称する。ただし、P型で透過率 $K_T \leq 0.6$, 反射率 $K_R \leq 0.5$ を満足するのは入射波周期 $T \leq 1.6$ sec の波浪条件下である (図11.13参照)。

11.4.2 改良型

基本型 (P型) では $T \geq 2.0$ sec の長周期の波で、透過率が目標としている0.6より大きくなり、長周期の波に対して必ずしも満足する消波効果が得られなかつ

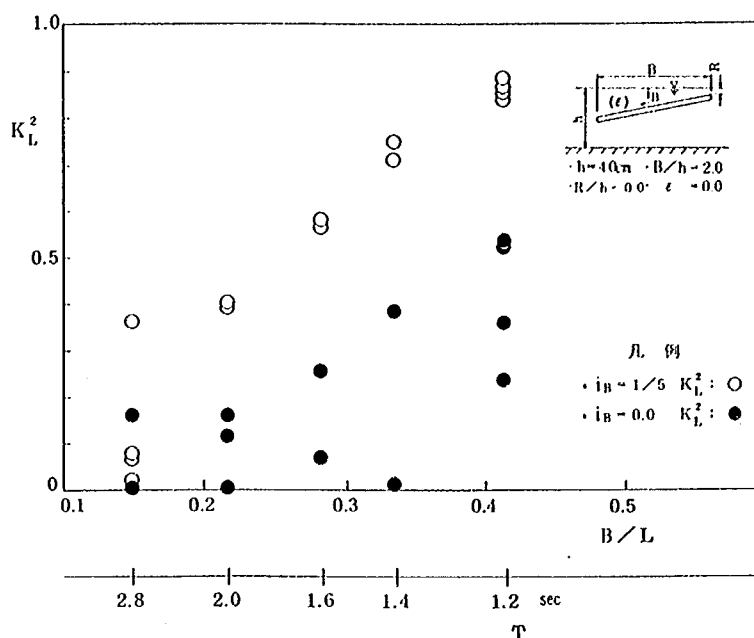


図11.11 $i_B=0.0$ と $1/5$ の K_L^2 の比較 ($R/h=0.0$)

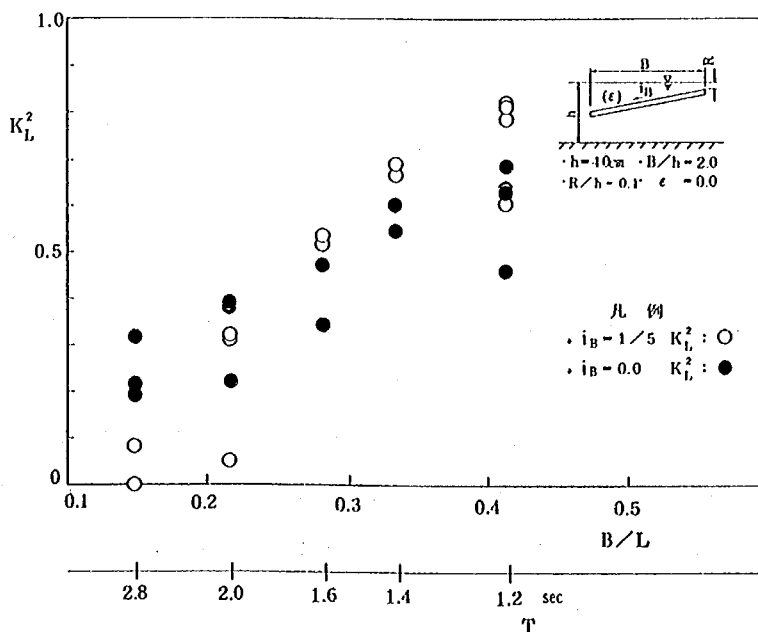


図11.12 $i_B=0.0$ と $1/5$ の K_L^2 の比較 ($R/h=0.1$)

た。そこで消波効果の改善，特に長周期の波に対して透過率の低下を図るために以下の2つのタイプで実験を行った。

(1) 改良Ⅰ型（C1型）

P型の K_R は， $K_R \leq 0.3$ で， K_R の目標値0.5に対してまだ余裕がある。そこで斜板の下部を不透過にし， K_R を増大させることによって K_T を減少させ消波性能を目標値に近づけるための型式としてC1型の実験を行った。ここで，P型では $i_B = 1/5$ を選定したが，C1型では K_R を増大させるために堤体前面を高くして $i_B = 1/10$ とした。P型とC1型の K_T, K_R の比較を図11.14に示す。 $T \geq 1.6 \text{ sec}$ の長周期の波（ $B/L \leq 0.3$ ）では，C1型の K_T が，P型より0.15～0.3程度低下する。ただし， $T \leq 1.4 \text{ sec}$ の短周期の波（ $B/L \geq 0.33$ ）では，C1型の K_T は逆に大きくなる。結局，C1型ではP型と比べて $T \geq 1.6 \text{ sec}$ の長周期側で消波性能は向上する。しかし，目標とする消波性能は

得られなかった。長周期の波に対して K_T が目標値を満足しないのは，堤幅に対して波長が長すぎるため砕波の度合いが弱く K_L^2 が小さいこと，および斜板上での砕波後の水塊が，斜板背後に落ち込むことによって，この水塊が堤内側に新たな波を発生させていることによる。

(2) 改良Ⅱ型（C2型）

C1型よりさらに K_T を低減させる工夫として斜板上に棧粗度を配置し，また堤体前面および斜板後部に開口部を設けたC2型で実験を行った。棧粗度は，砕波および水の乱れを促進させ

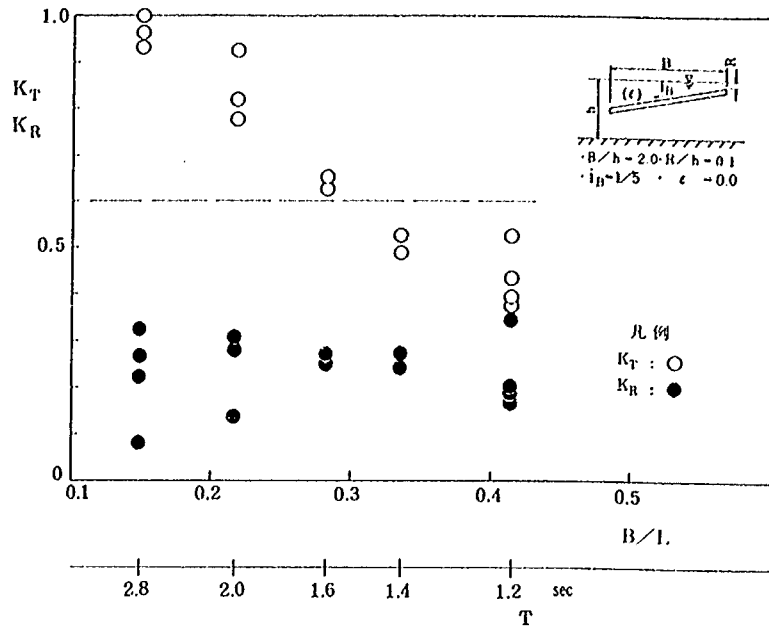


図11.13 P型の K_T, K_R と B/L の関係

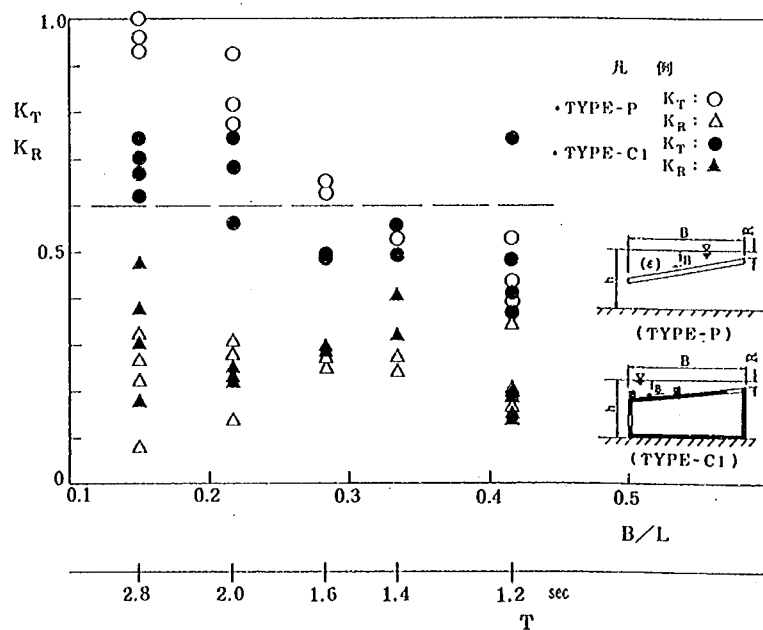


図11.14 P型とC1型の K_T, K_R の比較

るのが目的である。斜板後部の開口部は砕波後の落下水塊を低減すること、また堤体前面の開口部は斜板後部の開口部との組み合わせで波の位相差による消波を図ることをねらいとしている。水塊の落ち込みと波の位相差が含まって、消波効果を上げている状況が実験中観察された。P型とC2型の K_T , K_R の比較を図11.15に示す。 $T \geq 2.0$ secの長周期の波($B/L \leq 0.22$)で、C2型の K_T が、P型より0.4~0.5程度低下し、消波性能の著しい改善がみられ、 $T = 1.2 \sim 2.8$ secのすべての周期の波に対して、 $K_T = 0.4 \sim 0.6$, $K_R \leq 0.4$ となり、目標とする消波性能が得られた。

次に、入射波が堤体を通過するときのエネルギー損失率 K_L^2 を、P型とC2型で比較したのが図11.16である。図中には、消波性能の目標値から換算した K_L^2 の目標値 $K_L^2 = 0.4$ を破線で示している。P型の K_L^2 は、周期に大きく依存し、

周期が長くなるほどエネルギー損失は期待できなくなる。一方、C2型では、周期に関係なく、 $K_L^2 \geq 0.5$ となり、いずれの周期に対しても目標値を満足していることがわかる。以上のことから、目標とする消波性能を有する消波潜堤が開発されたと言える。その諸元を、実機に換算すると表11.4の通りである。

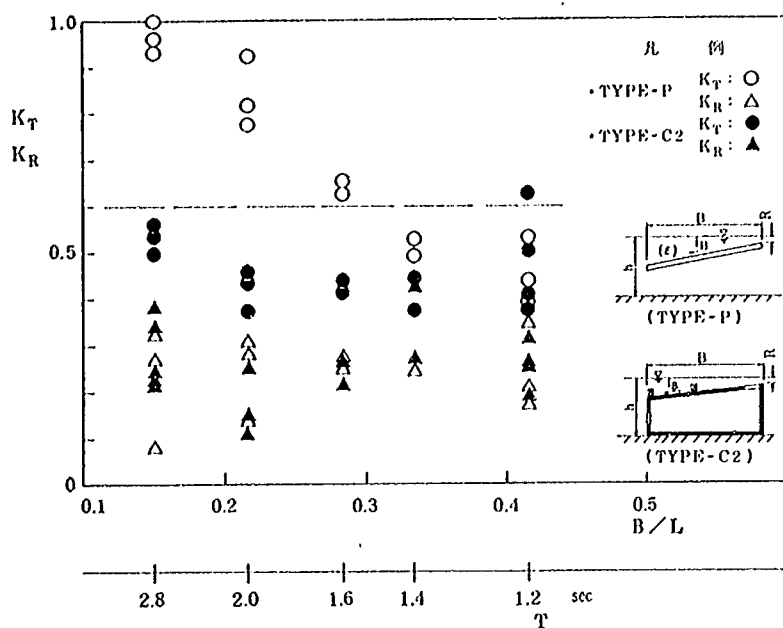


図11.15 P型とC2型の K_T , K_R の比較

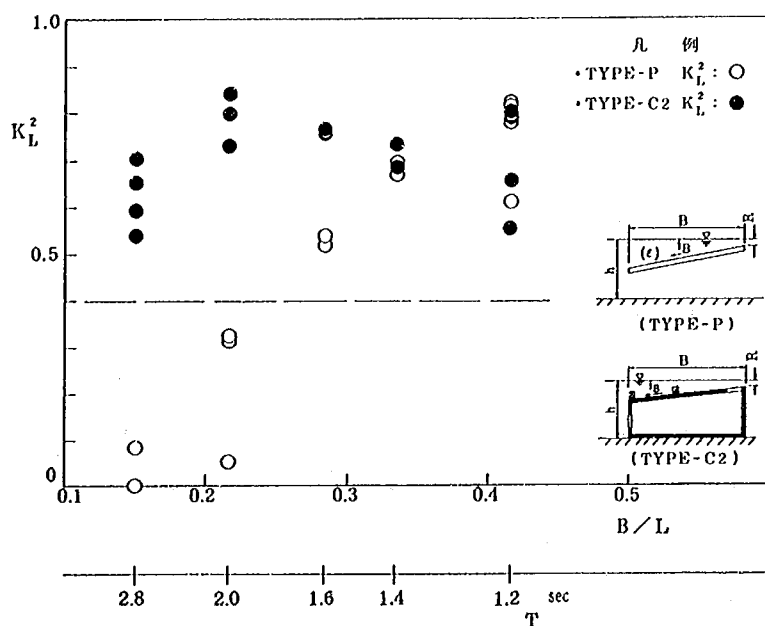


図11.16 P型とC2型の K_L^2 の比較

表11.4 斜板消波潜堤の実機諸元

構造形式	水深 h	10m
	波高 H	1 ~ 4 m
	周期 T	6 ~ 14sec
	タイプ	斜板消波潜堤C 2型
	堤体幅 B	20m
	没水深 R	1m
	斜板の勾配 i_B	1 / 10
	斜板の空隙率 ϵ	0
	斜板後部の開口幅 a	2.25m
式	堤体前面の開口幅 b	1.25m
	棧粗度高 K	1.125m

11.5 まとめ

今回の水理模型実験によって、没水斜板が波のエネルギーを水面付近に集中させ砕波を促進させることにより高い消波性能を持つことが確認された。以下に、消波性能の目標値 ($K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$) を満足する斜板消波潜堤の構造形式をまとめる。

- (1) 基本型 (P型) は、基礎構造上に斜板を波の進行方向に対し前方を深く、後方を浅く傾斜させて設置することにより、入射波エネルギーを水面付近に集中させ砕波を促進し消波を行う形式である。この型式での斜板の基本形状は、相対堤体幅 $B/h=2.0$ 、没水比 $R/h \leq 0.1$ 、空隙率 $\epsilon=0.0$ 、勾配 $i_B=1/5$ である。ただし、この形状の反射率 K_R は最大でも 0.35 程度で、 $K_R \leq 0.5$ を満足するが、入射波周期 $T \geq 2.0$ sec の波浪条件では、透過率 $K_T \leq 0.6$ を満足できない。
- (2) 改良Ⅰ型 (C1型) は、斜板の下部を不透過とし、さらに $i_B=1/10$ として反射率を大きくし、透過率を低減させることをねらいとした型式である。P型より $T \geq 1.6$ sec の長周期の波で透過率 K_T は 0.15~0.3 程度低下する。ただし、入射周期 $T \geq 2.0$ sec の波浪条件では、 $K_T \leq 0.6$ を満足できない。
- (3) 改良Ⅱ型 (C2型) は、C1型の斜板上に棧粗度を複数配列することにより、砕波および水の乱れを促進し、斜板後部と堤体前面に開口部を設けて、水塊の落ち込みを防止するとともに波の位相差消波を図ることにより透過率をさらに低減させることをねらいとした型式である。P型より $T \geq 2.0$ sec の長周期の波の透過率 K_T は 0.4~0.5 程度低下し、消波性能の著しい改善がみられた。また $T=1.2 \sim 2.8$ sec のすべての周期の波に対して $K_T \leq 0.4 \sim 0.6$, $K_R \leq 0.4$ となり、目標とする消波性能を満足する。

1.1.6 今後の検討課題

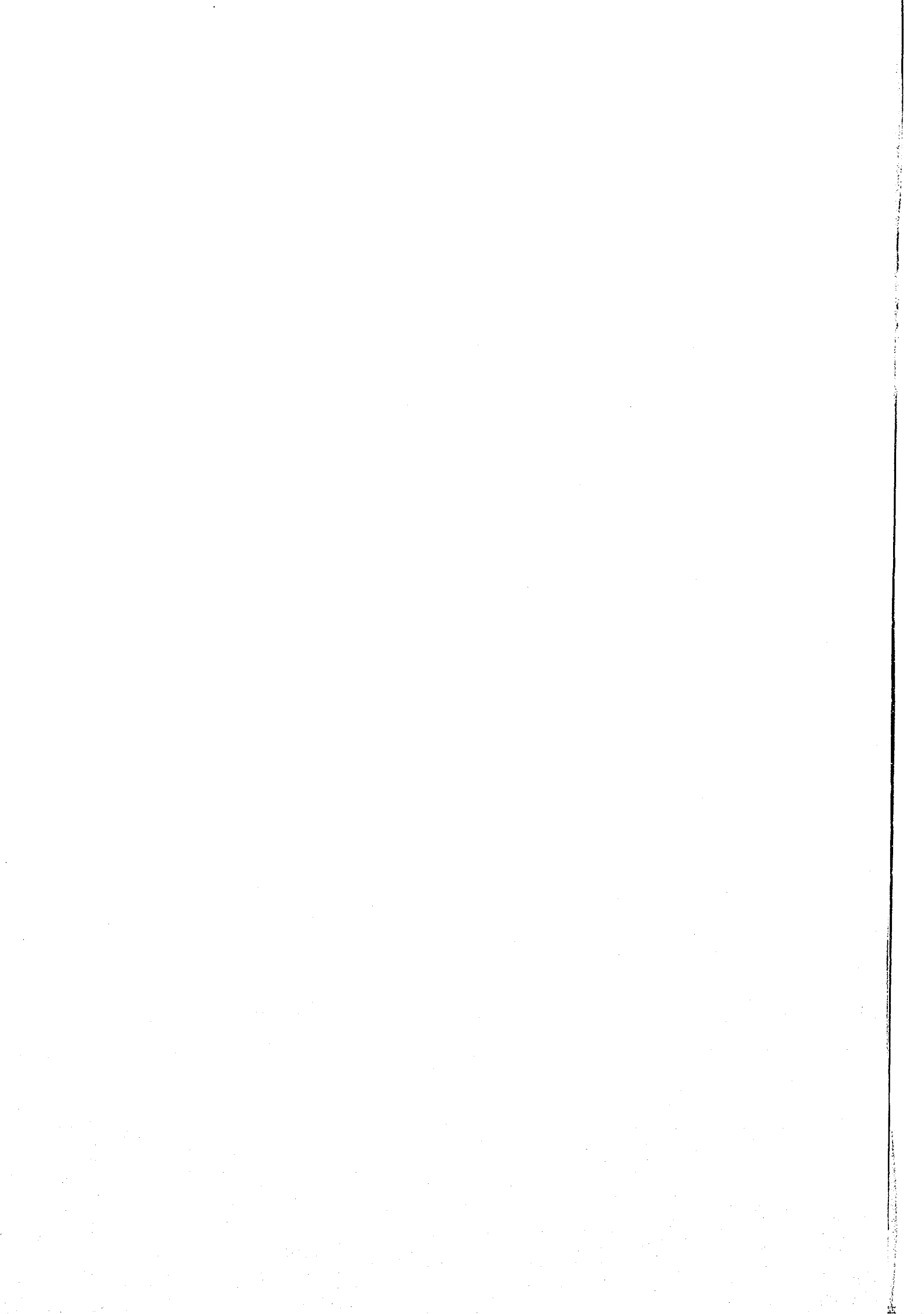
- (1) 今回の水理模型実験により、C2型では、没水比 $R/h=0.1$ の条件で、 $K_T \approx 0.4 \sim 0.6$ 、 $K_R \leq 0.4$ と目標とする消波性能が得られた。しかし、実際潜堤を設計する場合、干満の差を考慮する必要がある。そのため、没水比 R/h を変化させ、どの程度の波浪条件まで消波性能を満足するかを確認する。
- (2) 斜板消波潜堤を設置したことによる洗掘特性、および周辺海域の漂砂特性を実験により明らかにするとともに、その予測手法を確立する。
- (3) 構造物に作用する全体波力、および局部波力を把握する。
- (4) 斜板消波潜堤の設計方法、施工方法を検討するとともに経済性を追求する。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，24p.，1976.

第12章 円形消波潜堤に関する研究

建設省土木研究所海岸研究室	室長	宇多	高明
	研究員	村井	禎美
大成建設㈱技術開発部		神崎	正
		古川	圭三
		酒井	雅史



1 2.1 まえがき

本研究は、没水型消波堤として、主に砕波および乱れのエネルギー損失により海域の静穏化を図ることを目的としたいくつかの構造タイプについて、波の反射および透過に関する水理模型実験を行い、それぞれの水理特性を明らかにしたものである。消波構造のタイプは、不透過または空隙をもつ堤体を水面下に設置した“円形消波潜堤”を基本構造としている。ただし、これはあくまでも基本特性を見るためのものであり、形状については、水理特性以外の設計・施工面の検討を加えることにより選定している。本研究は、こうした観点より、さまざまな角度からの消波特性を実験的に検討したものである。目標とする消波性能は、透過率が $K_T \leq 0.6$ 、かつ反射率が $K_R \leq 0.5$ としている。

1 2.2 構造形式概要

水理実験の対象とした構造は、図12.1に示すような透過および不透過型の円形消波潜堤を基本型とした。透過型では、堤体全体に一樣な空隙をもつような構造を考え、水平方向に矩形の孔を貫通させた構造とした。なお、空隙率は空隙の体積の堤体全体の体積に対する比率とした。

(1) 基本型 (図12.1)

この構造は、基本的に天端水深を浅くし、それから生じる反射と強制砕波によって波浪の減衰を図るものである。堤体が透過型の場合は、上記の砕波に加えて半円柱に無数の孔をあけることにより、孔入口付近での水粒子の乱れと空隙内での摩擦損失とにより、波のエネルギーの減衰を図る。

(2) 改良型 (図12.2)

(1)の構造が全面不透過あるいは全面透過であるのに対して、この構造は両者を組合せたもので、透過型構造において波の進行方向に

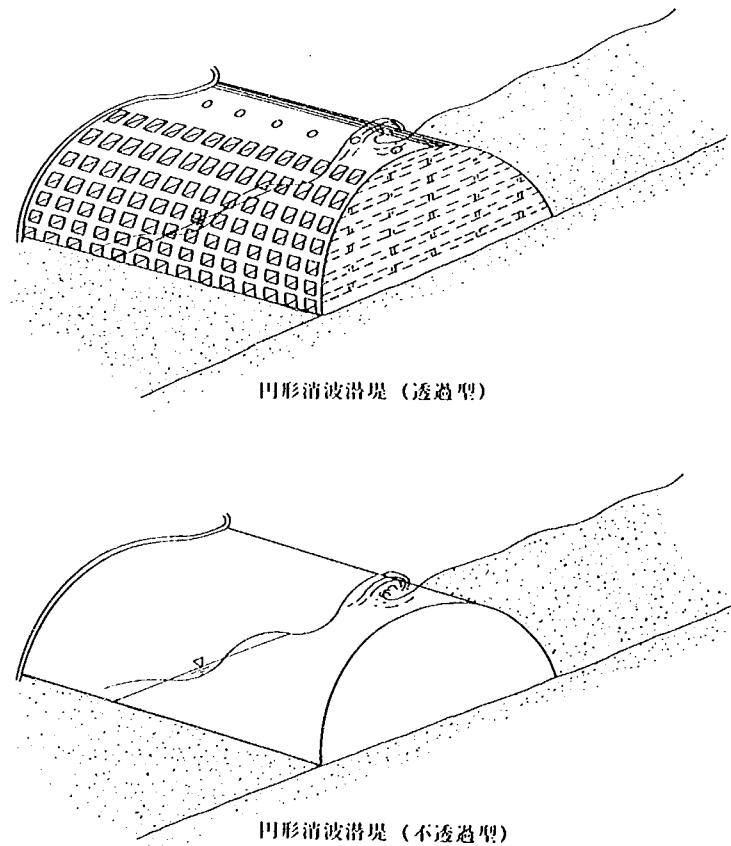
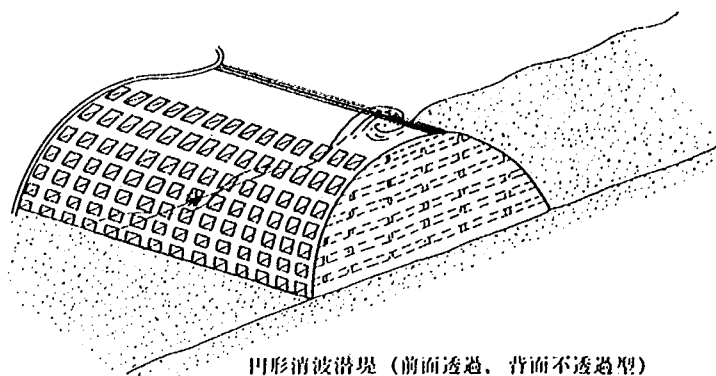


図12.1 円形消波潜堤構造形式（基本型）

対して背面だけを不透過としたものである。すなわち、潜堤内部の空隙はそのままであり、背面の水の出口のみが塞がれた構造となっている。この構造により、全面不透過の構造と比較して、前面の反射率を低減させることを目的としている。



円形消波潜堤（前面透過、背面不透過型）

図12.2 円形消波潜堤構造形式（改良型）

12.3 実験方法

12.3.1 実験装置

実験は、図12.3に示される大成建設(株)技術研究所の二次元造波水路を用いた。水路は全長47.0 m、幅0.8 m、高さ1.6 mで、水路端には、油圧式不規則造波装置が取り付けられている。水路床は、造波板から8 mの地点まで水平床で、そこから3 mを勾配1/20、9 mを勾配1/50の斜面とし、さらにこれより先21 mを水平床とした。また、水路端には消波装置を設けている。堤体模型の設置位置は、造波板から31 mの地点であり、水路は片面ガラス張りで側面からの観察が可能である。

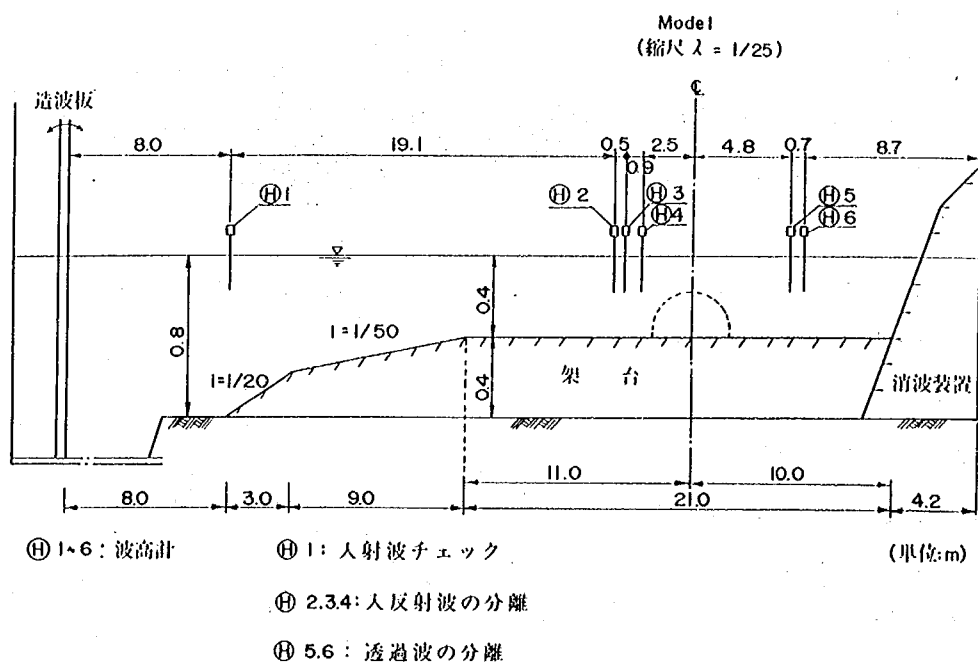


図12.3 実験装置

12.3.2 水理条件

模型の縮尺は1/25であり、現地と模型との対比を表12.1に示す。消波性能の検討に用いた実験波はすべて規則波であり、表12.2に示す15波浪（土研提示11波＋4波）を選定した。

表12.1 実物と模型との対比

諸元	実物	模型
水深	10m	40cm
波高	1m～4m	4cm～16cm
周期	6sec～14sec	1.2sec～2.8sec

12.3.3 実験ケース

実験ケースは表12.3に示されており、円形消波潜堤の空隙率(ϵ)、没水比(R/h)を変化させ、基本型について9ケース、また、改良型について2ケースの計11ケースの実験を行った。また、このような円形潜堤の幅の消波効果に及ぼす影響をみるため、後述の図12.11と図12.12に示すような1/4円と半円を2つ並べたケースの実験を行った。しかし、厳密には、半円とは形状が異なるため、参考実験とし、表には記入していない。

表12.2 波浪条件

周期 T (sec)	波高 H (cm)	波長 L (cm)	波形勾配 H/L
1.2	4	194	0.021
"	8	"	0.041
1.4	8	239	0.033
"	16	"	0.067
1.6	8	283	0.028
"	12	"	0.042
"	16	"	0.057
2.0	4	369	0.011
"	8	"	0.022
"	12	"	0.033
2.4	4	453	0.008
"	8	"	0.018
"	12	"	0.026
2.8	8	535	0.015
"	12	"	0.022

12.3.4 計測方法

入射波高は、模型設置点より、2.5m前面に波高計を設置し、模型を設置しない状況で検定を行った。透過波高は、図12.3に示す波高計⑤、⑥から読み取った。反射率 K_R は、図12.3に示す波高計②～④から得られたデータを合田らの方法¹⁾を用いて、入射波高と反射波高を求め、反射波高/入射波高により算出した。透過率 K_T は、透過波高/入射波高により算出した。

12.4 透過および反射特性に関する実験結果

12.4.1 基本型の水理特性

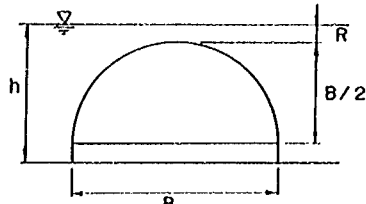
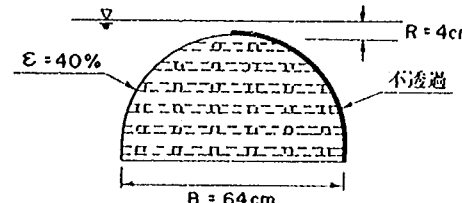
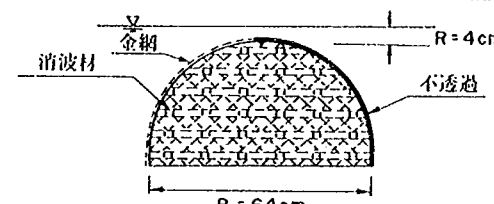
(i) 堤体の透過・不透過による影響 (Case 2, 5, 8)

基本型の実験については、表12.3に示すとおり、 R/h を0, 0.1, 0.2と3ケース変化させ、また堤体の空隙率を0, 0.4および0.6の3種類変化させ合計9ケースについて行った。図12.4に空隙率 $\epsilon = 0$, $R/h = 0.1$ のCase 2および空隙率 $\epsilon = 0.4$, $R/h = 0.1$ のCase 5の K_T , K_R と相対幅 B/L との関係を示す。ただし、波高による K_T , K_R の違いが明確ではなかったため、代表波高として8cmと12cmの場合を図示した。図12.4によれば、透過型のケースの反射率は今回の実験

波の範囲内では、 $K_R \leq 0.5$ をすべて満足したが、透過率 K_T については、0.6を上回る結果が多かった。一方、不透過型では、長周期の波（現地14秒）を除いて、ほぼ $K_T \leq 0.6$ を満足しているが、反射率は $B/L < 0.17$ （現地10秒以上の波）で $K_R \geq 0.5$ となっており、必ずしも満足する消波効果が得られていない。また、図12.5に空隙率 $\epsilon = 0.4$ 、 $R/h = 0.1$ のCase 5および空隙率 $\epsilon = 0.6$ 、 $R/h = 0.1$ のCase 8の K_T 、 K_R と相対幅 B/L の関係を示す。この図によれば、空隙率の違い（ $\epsilon = 0.4$ と $\epsilon = 0.6$ ）による反射率、透過率への影響はほとんど見られないようである。

以上の結果より、潜堤の堤体自身は不透過とし、反射率を減

表12.3 円形消波潜堤構造条件

実験ケース	空隙率 ϵ	没水比 R/h	模 型 図
1	0	0	 (註) i. 実験模型の使用記号を上図に示す。 ii. 実験模型諸量は次の通りである。 $h = 40 \text{ cm}$, $B/h = 1.6$, 奥行き 80 cm（水路幅）
2		0.1	
3		0.2	
4		0	
5	0.4	0.1	
6		0.2	
7	0.6	0	
8		0.1	
9		0.2	
10	0.4	0.1	
11	0.3	0.1	

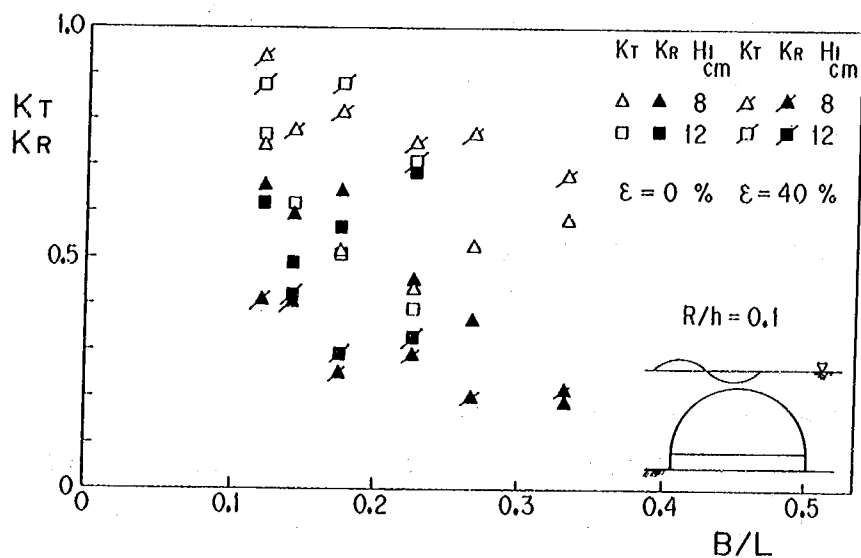


図12.4 透過・不透過構造による K_T 、 K_R の相違の比較

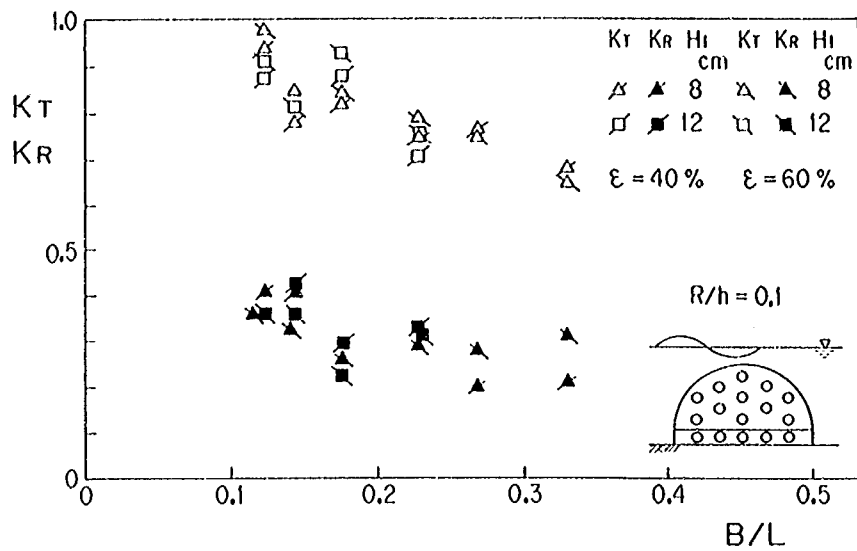


図12.5 空隙率の違いによる K_T, K_R の相違の比較 (全面透過)

小さくするような構造形式をとれば、 $K_R \leq 0.5$ 、 $K_T \leq 0.6$ の条件を満足すると推測される。そこでCase10以降では反射波を低減させるような構造の選定を目的として実験を行った。

(2) 没水深の影響 (Case 1~3)

堤体が不透過の場合の3ケースについて、没水深 R を変化させ、その影響を検討した。図12.6にCase1 ($R/h=0$)とCase2 ($R/h=0.1$)、図12.7にCase2 ($R/h=0.1$)とCase3 ($R/h=0.2$)の K_T, K_R と相対幅 B/L の関係を示す。 $R/h=0$ の場合、透過率は $B/L < 0.14$ (現地12秒以上の波)を除いてほぼ $K_T \leq 0.6$ を満足しているが、反射率は $B/L \leq 0.22$ (現地8秒以上の波)

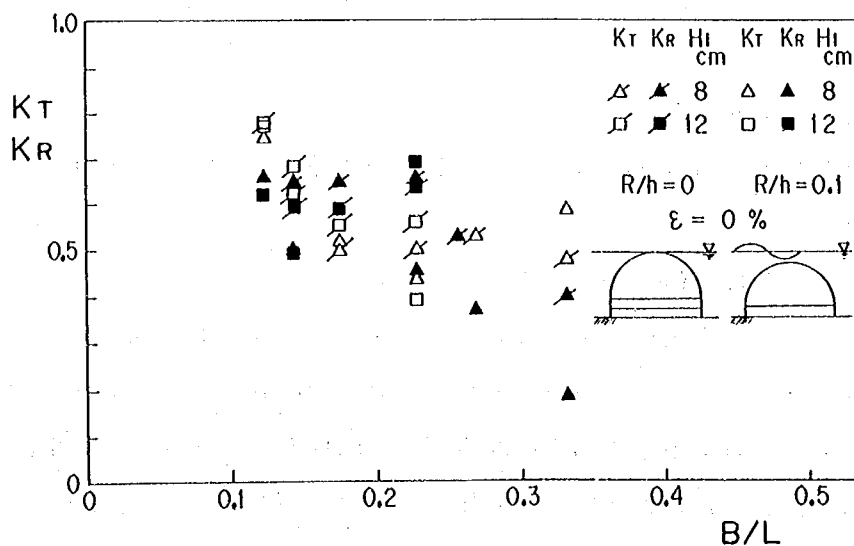


図12.6 R/h の違いによる K_T, K_R の相違の比較 (全面不透過)

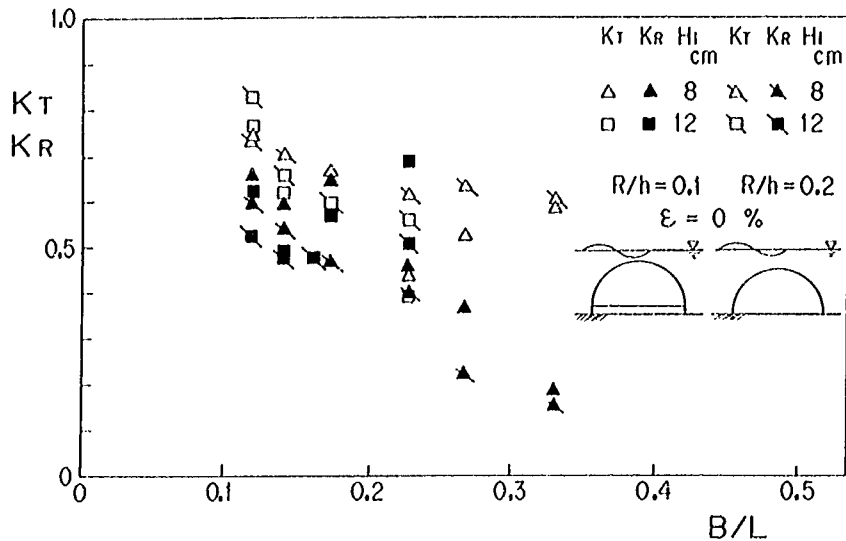


図 12.7 R/h の違いによる K_T, K_R の相違の比較 (全面不透過)

で $K_R > 0.5$ と大きい。また、 $R/h=0.2$ の場合、反射率はほぼ $K_R \leq 0.5$ を満足するが、透過率については B/L 全体にわたって 0.6 を上回る結果となっている。

一方、 $R/h=0.1$ の場合、透過率は $R/h=0.2$ の場合と比べてかなり小さく、 $B/L \leq 0.17$ (現地 10 sec 以上の波) を除いて、ほぼ $K_T \leq 0.6$ を満足している。反射率は、 $R/h=0$ の場合に比べて小さくなっており、 $B/L > 0.17$ (現地 10 秒以下の波) の領域については $K_R < 0.5$ となっている。以上のことから、透過率、反射率ともに満足しうる没水比としては、 $R/h=0.1$ が妥当であると考えられる。

このことより、Case 10 以降の実験はすべて $R/h=0.1$ で行い、空隙率 $\varepsilon = 0$ の模型の前面を透過型 (改良型) とし、反射率を低減させることを目的として実験を行った。

1.2.4.2 改良型の水理特性

基本型の改良型として背面のみ不透過とし、前面の空隙率を 0.4、および 0.3 とした 2 ケースについて実験を行った。

(i) 空隙率 0.4 の場合の特性 (Case 10)

堤体が不透過の場合の実験結果を考慮し、反射率を低減する目的で空隙率 0.4 の模型の背面に不透過な膜を取り付けたケースについて実験を行い、図 12.8 にその結果を示す。図中の破線および実線は透過率、反射率の平均的な傾向を表す。図 12.8 によれば、透過率は不透過の場合 (Case 2) に比べ、わずかに大きい。が、 $B/L \geq 0.17$ (現地 10 秒以下の波) では $K_T \leq 0.6$ となっている。一方、反射率は $B/L \leq 0.22$ (現地 8 sec 以上の波) で 0.5 以上の部分があるが、不透過の場合 (Case 2) と比較して、 $B/L \leq 0.22$ の 0.6 以上の部分が消え、全体として若干小さくなっている。結局、前面を透過型とした場合、水粒子の乱れあるいは摩擦損失等により、反射率の

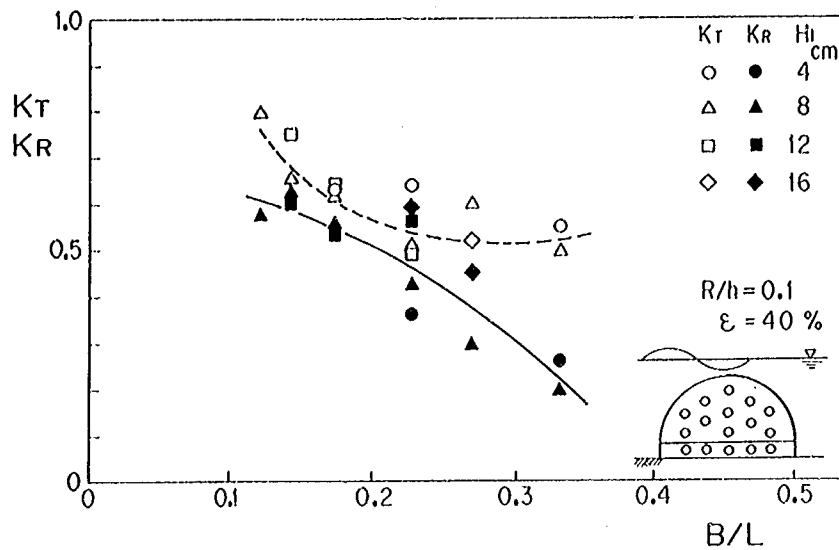


図12.8 Case 10 における K_T, K_R と B/L の関係

低減が行われたと考えられる。

(2) 空隙率0.3の場合の特性 (Case 11)

Case 10 よりもさらに反射率を低減するための試みとして、堤体前面の孔を小さくし、空隙率を減少させた場合を考えた。具体的には、空隙率0.4の堤体に消波材を充填し、空隙率を0.3として比較実験を行った。この実験結果を図12.9に示す。この図によれば、反射率はCase 10に比べると、特に波長の短い波に対して顕著に減少しており、波長の長い波に対しても、同等か若干小さい値となっている。透過率はCase 10とほぼ同様の結果となっている。

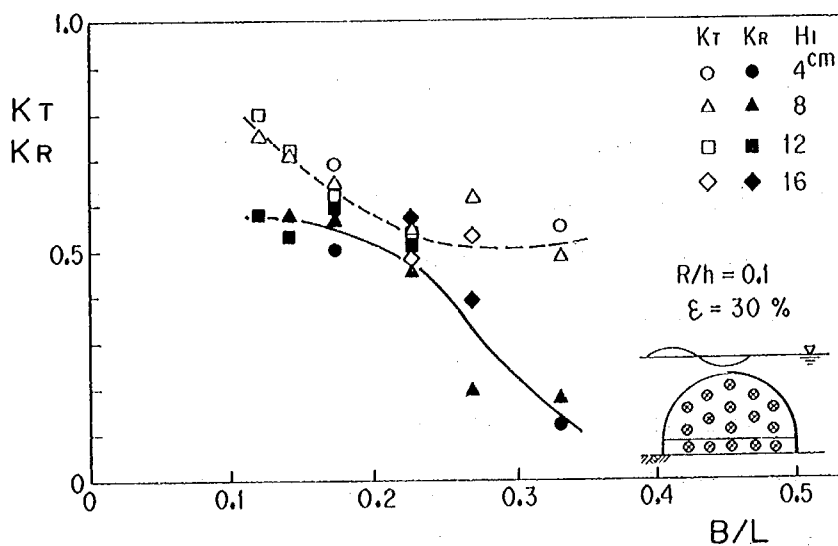


図12.9 Case 11 における K_T, K_R と B/L の関係

(3) 波形勾配の影響

Case 11 の透過率 K_T 、反射率 K_R と波形勾配 H/L との関係を図12.10に示す。 K_T は H/L が大きくなるにつれて緩やかに減少する傾向を示す。一方、 K_R は H/L にかかわらずほぼ一定の値を示しているが、 $H/L = 0.02 \sim 0.04$ で K_R の値が非常に小さくなるケースが認められる。これは周期の小さい波 ($T = 1.2, 1.4$ 秒) の場合であり、 K_R は波形勾配より周期の影響を強く受けるものと考えられる。

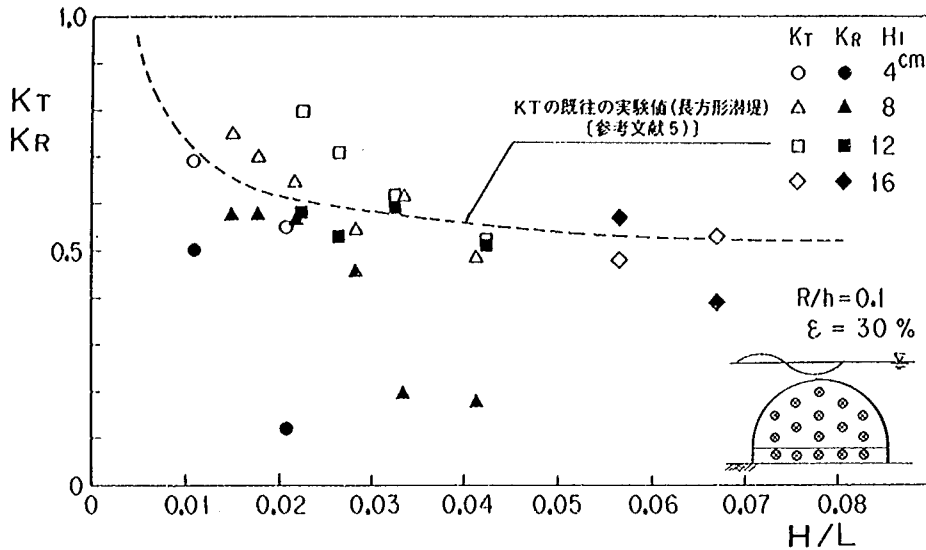


図12.10 Case 11 における K_T, K_R と H/L の関係

12.4.3 堤体幅の影響 (Case 12, 13)

Case 1~11 ではすべて円形潜堤単体について実験を行ったが、Case 12, 13 では潜堤の幅の効果をみるために図12.11に示すような半円をさらに1/4円とし、背面を直立とした構造 (Case 12) と、図12.12に示すように円形潜堤を2列に並べた構造 (Case 13) について消波性能を確認した。どちらのケースも Case 11 と比較するために、前面を透過型、背面を不透過型とした。

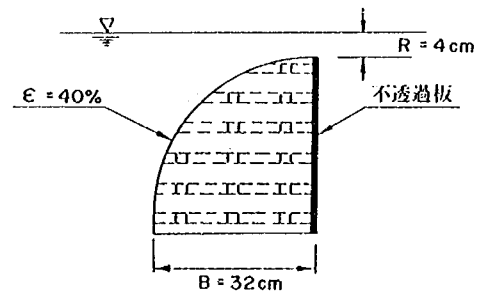


図12.11 円形消波潜堤 (Case 12)

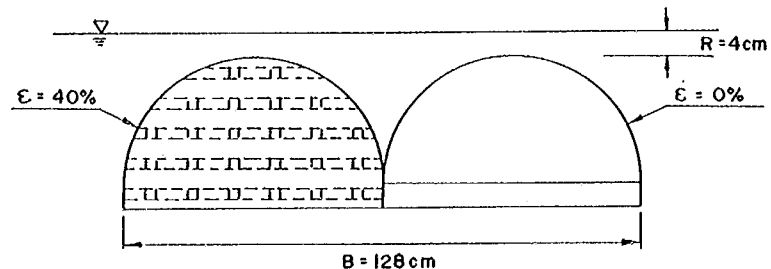


図12.12 円形消波複列潜堤 (Case 13)

Case 12, 13 についての実験結果を比較のため Case 11 の結果とあわせて図12.13に示す。横軸はこれまでのグラフと同じスケールで描いてある。図12.13によ

れば、 $B/L < 0.4$ で透過率は B/L の増加とともに徐々に減少しているのわかるが、 $B/L > 0.4$ では B/L に関係なくほぼ様な値を示す。反射率は B/L にあまり関係なく $0.2 \leq K_R \leq 0.6$ の値を示している。

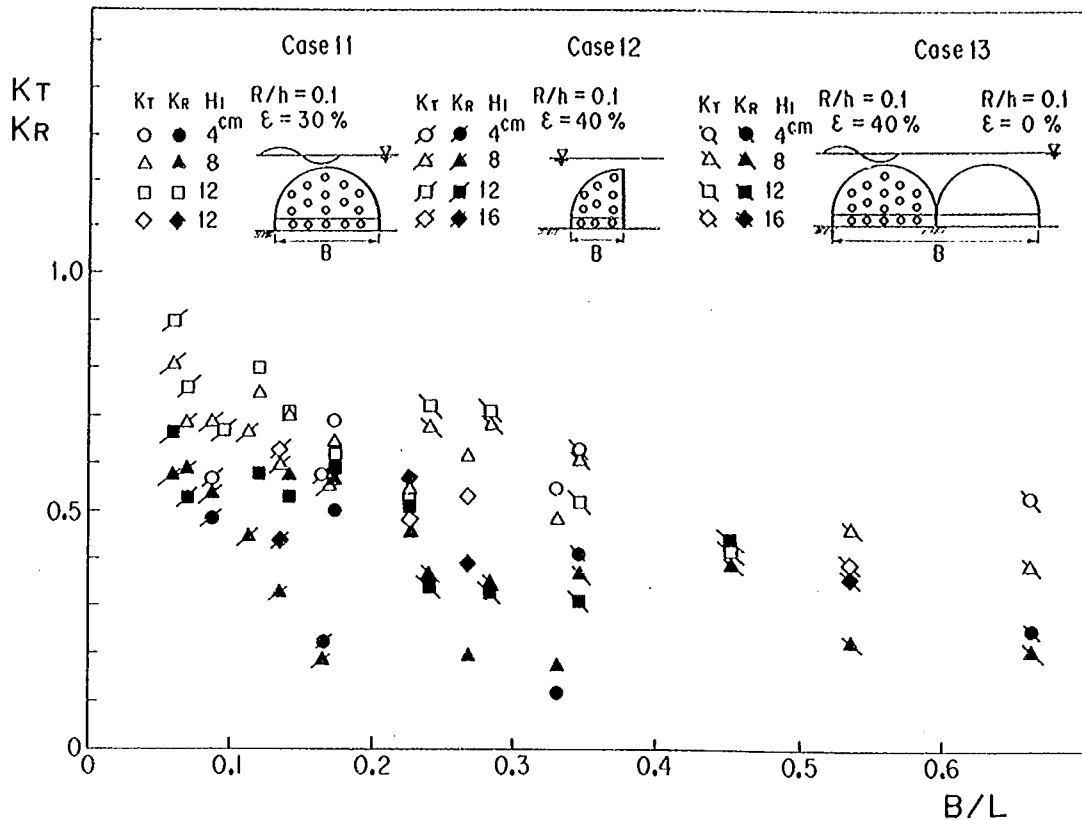


図12.13 Case 11, 12, 13 における K_T, K_R と B/L の関係

1.2.5 実験結果のまとめ

- (1) 堤体が不透過の場合、透過率 $K_T \leq 0.6$ をほぼ満足する構造諸元は没水比 $R/h = 0.1$ である。また、反射率は、 $R/h = 0.2$ でほぼ $K_R \leq 0.5$ である。 $R/h = 0.1$ の場合、短周期の波においては $K_R \leq 0.5$ であるが、長周期の波では $K_R > 0.5$ であるため、反射率を低減させる工夫が必要である。
- (2) 空隙率 $\epsilon = 0.4$ の模型で背面のみを不透過にした場合、反射率は全面不透過の場合に比べ全体として若干減少した。透過率は全面不透過の場合に比べ、わずかに大きい値であった。
- (3) 空隙率 $\epsilon = 0.3$ で背面のみを不透過とした場合、 $\epsilon = 0.4$ のケースよりも反射率はわずかであるが減少し、さらに透過率はほぼ同等であった。このことから、空隙率をさらに小さくしていくと、エネルギー損失が期待でき、反射率がさらに低減されると予想される。しかし、限りなく小さくすると $\epsilon = 0$ に近づくため、逆に反射率は大きくなる。従って、 $0 < \epsilon < 0.4$ の間に反射

率が極小値を持つような最適の空隙率があることも考えられる。このことから、逆に堤体全体を透過型とした場合、反射率だけでなくエネルギー損失率が極大となり、透過率が極小値を持つような最適な空隙率が存在することも推察される。

- (4) 堤体幅に関しては、 $B/L < 0.3$ と波長に対して堤体幅の短い場合には幅の影響を強く受け、透過率は大きくなる。しかし、 $B/L > 0.4$ では幅が大きくなっても透過率はそれほど小さくならず、幅を広げることで逆に不経済となることがわかった。ただ、今回の実験では、1/4 円形と2列の潜堤という具合に潜堤の形状が厳密に言えば異なるため、相似形状を用いた実験が今後必要と思われる。

1.2.6 今後の検討課題

実験で対象とした構造形式を大水深あるいは大波浪条件下の実海域に適用する場合、以下の各課題について検討する必要がある。

〔設計上の課題〕

- ① 最適な構造形式を選定するためには、水理特性と同時に構造物の滑動、転倒などの安全性もあわせて考慮し、その経済性の総合的な検討を行う必要がある。
- ② そのためには、構造物に作用する波力およびその分布を明らかにし、水平力、揚圧力等の設計外力の考え方を明確にする必要がある。

〔施工上の課題〕

- ① 施工方法として、プレハブ方式あるいはセメント系固化材の注入方式など、さまざまな案についての施工性、経済性を考慮し、最適な方法を検討する必要がある。
- ② 施工中の構造物の安定性、さらに、硬化後の注入材の耐久性等に対する検討を行う必要がある。
- ③ 軟弱地盤上に施工する場合、構造物を1/4 円形とし、杭に固定する方法も考えられ、さまざまな条件下における最適な構造形式を用意する必要がある。

〔海浜地形変化に関する課題〕

本構造物の設置に伴う海浜地形の変化を予測するために、移動床実験を行い構造物周辺の洗掘あるいは堆積状況を明らかにし、漂砂制御ならびに侵食防止効果について検討する必要がある。

〔その他の課題〕

- ① 空隙率が0.3より小さい構造物で、消波特性が最適となるかどうかを、今後実験により確認する必要がある。
- ② 現象を事前に計算により確認する必要があることから、砕波をうまく再現でき、実際の現

象をより正確に再現する新しい数値計算法の開発が必要である。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，
港湾技研資料，No.248，24p.，1976.
- 2) 加藤重一・上北征男：ブロック積消波堤の消波効果について，土木学会論文報告集 第165
号，pp. 23～30，1969年5月.
- 3) 井島武士・佐々木富雄：潜堤の効果に関する理論的研究，第18回海岸工学講演会論文集，
pp. 141～147，1971.
- 4) 永井莊七郎・小田一紀・倉田克彦：大水深緩斜面捨石潜堤に関する研究，第22回海岸工学講
演会論文集，pp. 409～414，1975.
- 5) 三浦 晃・遠藤茂勝：潜堤の波高伝達特性について，第25回海岸工学講演会論文集，
pp. 293～296，1978.
- 6) 永井莊七郎・倉田克彦・長谷川恵一：潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響，第24回海岸
工学講演会論文集，pp. 303～307，1977.

第13章 あ と が き

本報告書では9タイプの構造物についてその消波効果を実験により明らかにした。また、一部構造物については重複波作用時における波力も明らかにした。既に発表された第1報と本報で、多くの構造物タイプの消波効果について検討が行われた。

昭和62年度から、これらの構造物を次第に絞って検討を続けて行く予定である。また土木研究所側も、海岸研究室の他に構造研究室も加わって研究を進める予定である。

海域制御構造物の開発に関する
共同研究報告書(2)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 2510号
昭和62年7月(1987年)

要旨

各種の海域制御構造物モデルの消波効果を2次元及び平面水理模型実験によって調べ、各モデルの消波性能を明らかにした。

キーワード: 海洋開発, 海域制御構造物, 消波効果, 透過率, 反射率, 共同研究, 静穏域

郵便はがき

305-□□

40円切手
をはいて
下さい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

海岸研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第2510号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩

