

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 (4)

昭和63年 2 月

建設省土木研究所
河川部海岸研究室

Copyright © (1988) 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、複写は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

海域制御構造物の開発に関する 共同研究報告書 (4)

建設省土木研究所海岸研究室	長	宇村	多	高	明
研 究 員		山	井	禎	美
		藤	本	幸	次
部外研究員		武	原	隆	一
"		館	中	信	之
"		岡		克	彦
飛島建設(株)総合企画本部技術開発部		松	尾	幸	夫
"		国	栖	和	男
五洋建設(株)技術本部技術研究所		福	山	広	志
"		高	木	博	信
三井建設(株)土木本部土木技術部		吉	川	春	生
"		田	村	雅	人
"		萩	原	直	明
清水建設(株)技術研究所海洋グループ		大	山	運	弘
"		茗ヶ	原		巧
大成建設(株)技術本部技術研究所		勝	井	義	彦
"		小	山	秀	博
"		中	塚	文	男
"		清	水	健	司
"				正	巳

(株)間組土木本部海洋土木部

〃

技術本部技術研究所

東急建設(株)施工本部土木技術部

〃

〃

住友金属工業(株)鉄構技術部

建設技術部

建設工学研究室

建設技術部

設計技術室

東亜建設工業(株)技術開発部

水理研究室

材料構造研究室

設計部

(株)大林組技術開発本部海洋技術部

新日本製鐵(株)鉄構海洋事業部

〃

〃

〃

戸田建設(株)土木技術開発室

〃

〃

〃

〃

湊本

隆

次

郎

陽

政

洋

富

英

種

泰

卓

秀

和

喜

康

裕

哲

陽

律

弘

敏

敏

文

文

要 旨

各種の海域制御構造物の消波効果、作用する波力について水理模型実験を行い検討した。
実験結果から各構造物の消波特性、作用する波力特性を明らかにした。

キーワード：海洋開発、共同研究、海域制御構造物、消波特性、波力特性

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月より土木研究所と民間企業14社との間で共同研究“海域制御構造物の開発”を行っている。その成果の一部は既に“海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(1), (2), (3)”としてとりまとめた。本報告は、前報に続いて62年12月までに得られた研究成果をとり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 体 制	1
第4章 海域制御構造物の開発の現状と特徴(土木研究所)	3
第5章 海域制御構造物に作用する波力の特性 (土木研究所)	21
第6章 不規則波作用下での海域制御構造物の消波効果 (土木研究所)	35
第7章 乱れと反射を利用した海域制御構造物の波力に関する水理模型実験(第1報)	
(第1グループ)	53
第8章 水平板付スリット型海域制御構造物に関する実験的研究 (三井建設㈱)	83
第9章 不規則波作用下での水平板付スリット型海域制御構造物の消波効果 (三井建設㈱)	95
第10章 斜板消波潜堤の安定性に関する研究 (大成建設㈱・㈱間組・東急建設㈱)	103
第11章 斜板消波潜堤の洗掘に関する実験的検討 (土木研究所)	121
第12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検討	
(住友金属工業㈱・東亜建設工業㈱)	133
第13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(3) (㈱大林組)	165
第14章 ハイブリッド式消波構造物の水理特性に関する研究 (新日本製鐵㈱・戸田建設㈱)	183
第15章 駿河湾海洋技術総合研究施設周りの洗掘実態 (土木研究所)	199
第16章 湘南海岸の地理的, 海岸工学的諸条件に関する検討 (土木研究所)	211
第17章 あ と が き	230

第1章 ま え が き

近年、余暇時間の増大に伴って、リゾート開発に関する議論が盛んになってきている。このような状況の中で、海洋性レクリエーションに関する需要も高まりつつあり、建設省でもマリーン・マルチ・ゾーン（MMZ）構想を推進し、外洋に面した沿岸域の有効利用を図ろうとしている。この構想の軸になるのが、沖合の水深10～20mに設置され、消波効果により静穏な海域環境を創出する海域制御構造物である。この海域制御構造物の開発は、昭和61年度より5か年計画で行われている。本報ではひきつづき検討を行っている海域制御構造物の研究の中で、62年12月までに得られた研究の成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にある。最初に、各種2次元水理模型実験を行い、各構造型式の透過率、反射率、作用波力等を求めて各種構造物の消波効果および波力特性を調べた。次に、海域制御構造物の設置により予想される大規模洗掘について駿河湾の海洋技術総合研究施設周りの洗掘を対象に調査した。さらに、海洋開発を行う場合に必要となる海岸工学的諸条件を湘南海岸をモデルに明らかにした。なお、共同研究の成果を既にとりまとめた土木研究所資料No.2454、No.2510、No.2511の目次を巻末に資料として示す。

第3章 研究体制

本共同研究は昭和61年8月より土木研究所と民間企業14社の間で行われている。民間企業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)・(株)間組・東急建設(株)

東 洋 建 設 ㈱

日本テトラポッド㈱

第3グループ ハイブリッド型消波構造物の開発

㈱ 大 林 組

住友金属工業㈱ ・ 東亜建設工業㈱

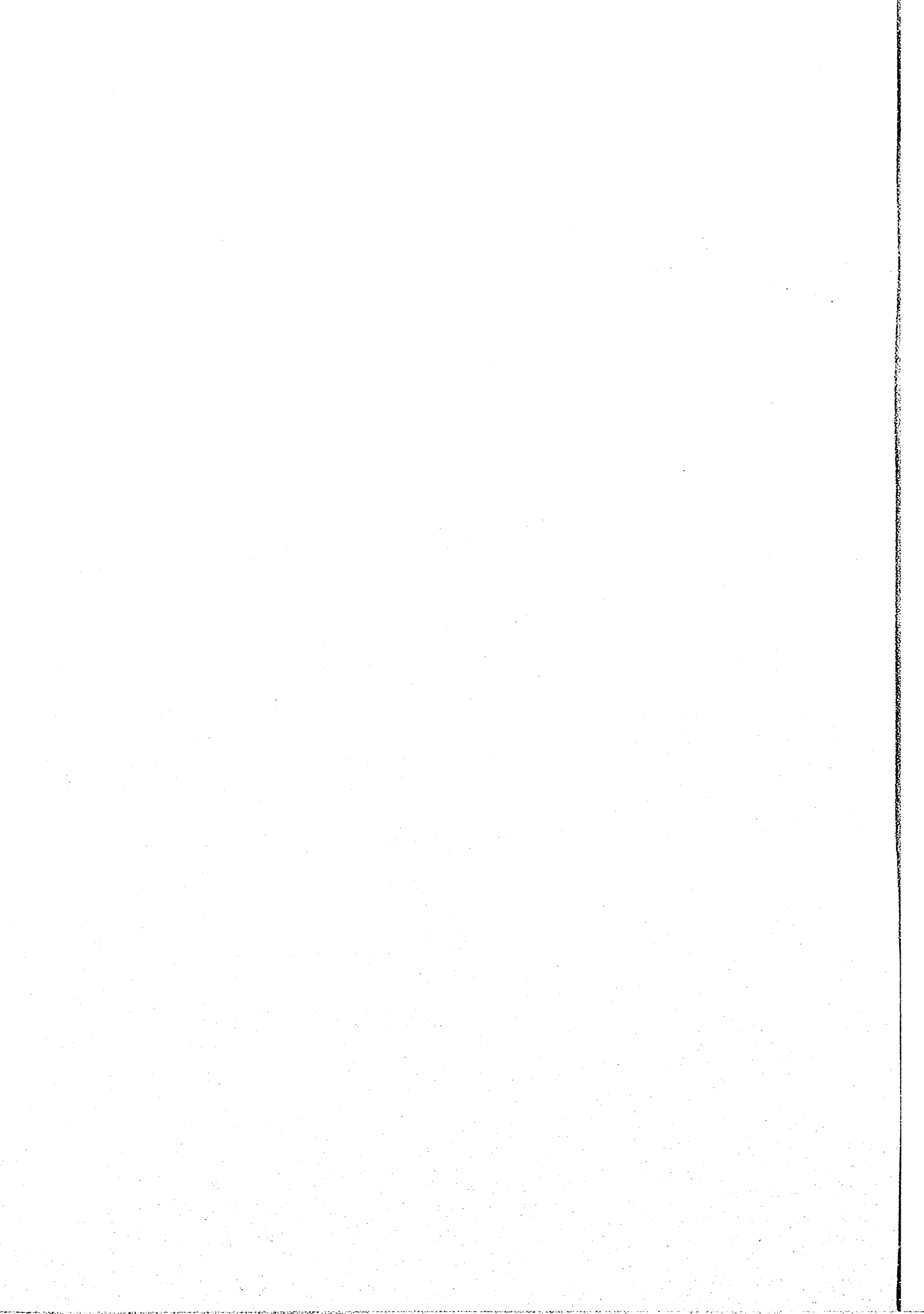
新日本製鐵㈱ ・ 戸 田 建 設 ㈱

本報告書はこのうち土木研究所，第1グループ，大成建設㈱・㈱間組・東急建設㈱，㈱大林組，住友金属工業㈱・東亜建設工業㈱，新日本製鐵㈱・戸田建設㈱の行った研究成果をまとめたものである。

第4章 海域制御構造物の開発の現状と特徴

建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明

建設省土木研究所海岸研究室 研究員 村井 禎美



4.1 まえがき

近年、余暇時間の増大に伴って、リゾート開発に関する議論が盛んになってきている。このような状況の中で、海洋性リクリエーションに関する需要も高まりつつあり、全国各地で種々の環境整備が進められるようになった。しかし、内湾域での開発を別にとすると、外洋に面した海岸は波浪が高く、また流れ、漂砂が活発であるために、そのままの形では海浜利用がなかなか難しいのが現状である。この意味から海洋性リ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、こうした海岸は、従来から侵食や高潮など自然外力による災害を受けてきた場所であって、それらに対し国土を保全することは従来と同様に重要である。したがって、上述の構造物が保全面からも利用できればその有効性は高いものがある。

このような状況の中で建設省でもマリーン・マルチ・ゾーン（MMZ）構想を推進し、外洋に面した沿岸域の有効利用を図ろうとしている。この構想の軸になるのが、沖合の水深10～20mに設置され、消波効果により良好な海域環境を創出する海域制御構造物である。海域制御構造物の開発は、昭和51年度より5か年計画で官民共同により行われている。本報では多数提案されている海域制御構造物のうち、代表的な6タイプの構造物についてその開発現状を報告する。

4.2 研究体制

海域制御構造物の開発は、建設省の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」の下で行われている。研究体制の全体構成を図4.1に示す。この中で海域制御構造物の開発については土木研究所と民間企業14社との共同研究で行われている。

4.3 開発のフロー

構造物の開発フローを図4.2に示す。ただし構造物のタイプは様々であるから、各構造物の検討項目は多少変化する。特に耐波安定性(2)については構造物が杭式であるか重力式であるかによって大きく異なる。研究開発を進める段階で、このうちどの項目を検討すべきか、あるいは検討する必要があるかないかも明らかになってくる。MMZ構想としては、図4.2のフローにしたがって構造物が開発された後に、利用面からの検討を行った上で全体計画が決定される。

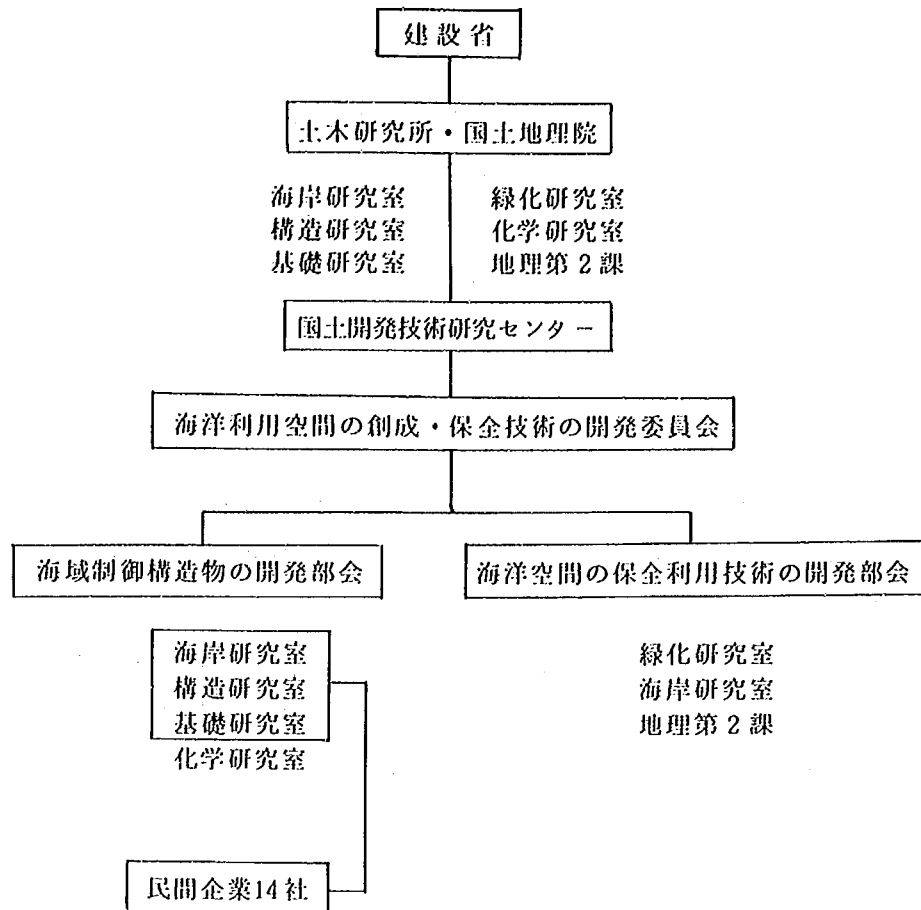


図 4.1 総合技術開発プロジェクトの全体構成

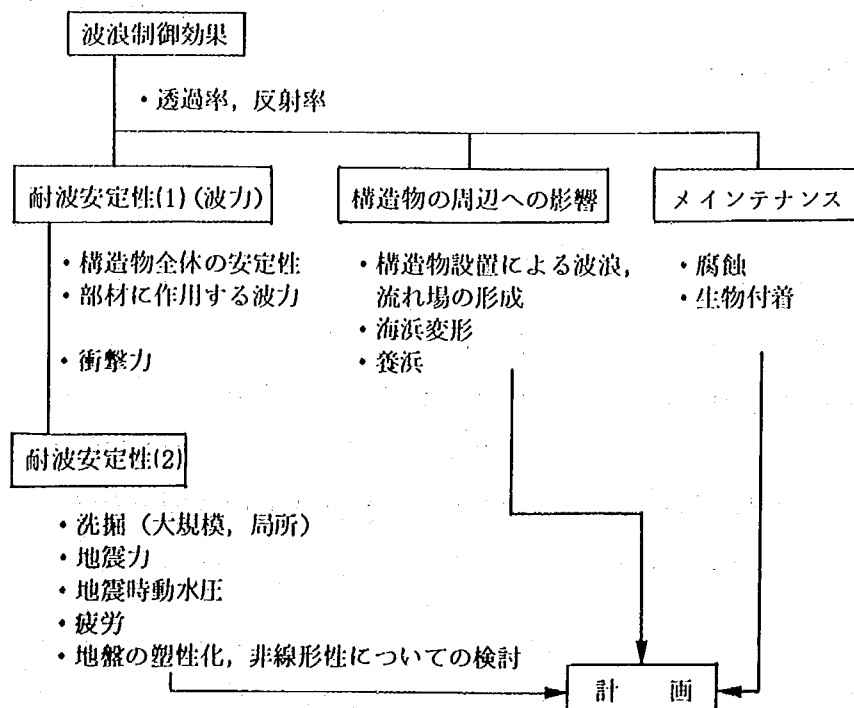


図 4.2 構造物の研究開発の流れ

4.4 代表的構造物の研究開発現状

総プロ「海洋利用空間の創成・保全技術の開発」は、昭和61年度より研究が開始されている。そのハード部門の中心となる海域制御構造物の開発も同時に始まっており、成果の一部は土木研究所資料としてまとめられている^{1), 2), 3)}。61年度には、各種タイプの構造物について主にその消波性能を水理模型実験により検討した。評価は透過率 K_T 、反射率 K_R 、エネルギー損失率 K_L^2 を用いて行った。ここに透過、入射、反射波高を H_T 、 H_I 、 H_R とすれば $K_T = H_T / H_I$ 、 $K_R = H_R / H_I$ 、 $K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2$ と表わされる。その結果をもとに62年度は模型のタイプを10種程度に絞り、検討を続けている。以下では現在検討中の構造物のうち、代表的な6つのタイプの構造物について、その特徴及び開発現状について述べる。

4.4.1 スリット式

波の進行方向にスリットを複数並べた構造を有する。図4.3にその鳥瞰図、図4.4に模式図を示す。

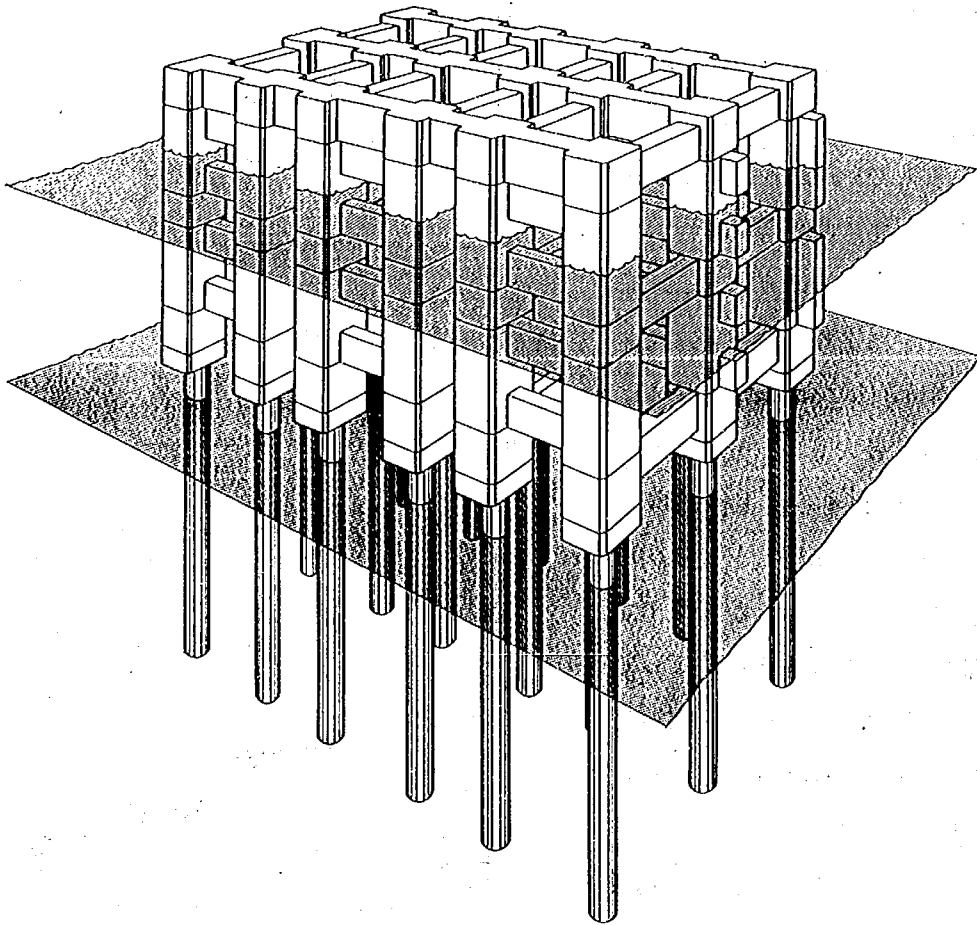


図4.3 スリット式構造物の鳥瞰図

この構造物はスリットを海水が通過するとき、乱れを生じさせて消波を行う。また複数のスリット板より反射する波を互いに干渉させることにより反射波を減少させる。考慮すべきパラメータはスリットの空隙率 ϵ （スリットにより空隙率が異なる場合には添字をつけて区別する）、吃水比 h_2/h 、スリット枚数 N 、および堤幅波長比 B/L である。消波性能としては $\epsilon = 0.2$ 、 $h_2/h = 0.7$ 、 $N = 2$ の構造条件でほぼ $K_T < 0.6$ 、 $K_R < 0.5$ となる。このとき K_R は $B/L = 0.25$ 付近で極小値をとる。3枚スリットにした場合、 K_T は平均的に見て0.02程度低下するだけである。これに対し K_R は極小値をもたず、 B/L の増加に伴って減少する（図4.5）。現地施工を考えた場合には、構造物の安定性の点から3枚スリットになると考えられる。スリットの空隙率 ϵ を変化させると、当然のことながら ϵ が大きいほど K_T は増大し K_R は減少する。吃水深 h_2 により消波効果は大きく異なり、 $h_2/h = 0.7$ の場合には $B/L = 0.15$ 付近で K_T は最大値0.7を示すのに対し、 $h_2/h = 0.85$ にすると $K_T = 0.6$ 、 $h_2/h = 1.0$ で $K_T = 0.45$ 程度となる。これに対し反射率は B/L にしたがって0.4から0.1の範囲で変化し、吃水比によって余り変化しない（図4.6）。結局、消波効果を向上させるためには吃水比を大きくする方が良いことがわかる。

次に波力について述べる。スリット式構造物のように透過性を持った構造物に作用する波力は、波の進行を完全に阻害する不透過壁に作用する波力と、杭のような構造

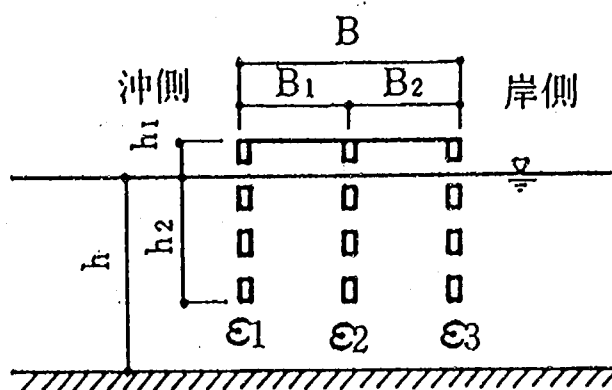


図4.4 スリット式構造物の模式図

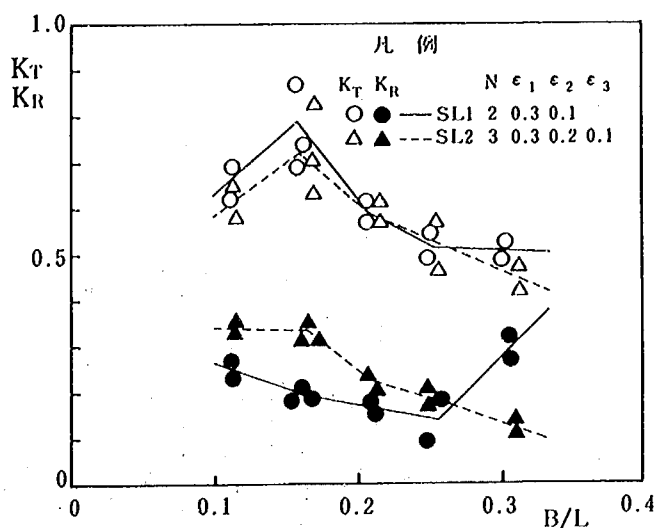


図4.5 スリット式構造物の K_T 、 K_R と B/L の関係（スリット枚数 N をパラメータとする）

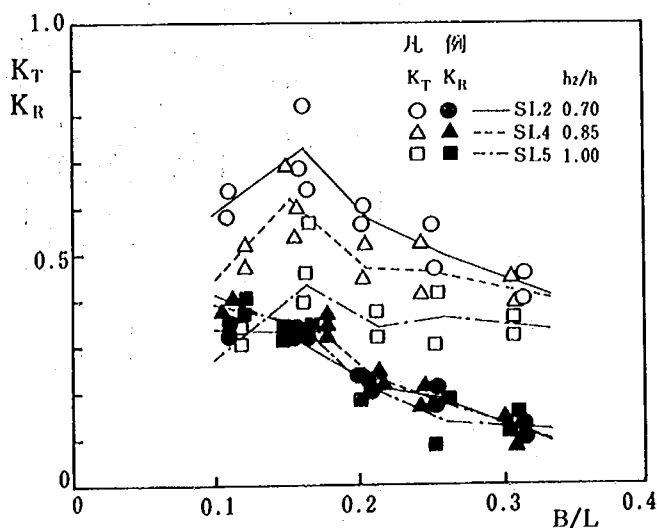


図4.6 スリット式構造物の K_T 、 K_R と B/L の関係（吃水比 h_2/h をパラメータとする）

物への波力との中間的な値を示すと考えられる。スリット式構造物に作用する波力については不明な点が多いが、スリット部に作用する波力を含田式に準じて算定し、下部工はモリソン式で波力を算定する方法がとれば便利である。重複波領域の波がスリットに作用する波力について検討した結果を図 4.7 に示す。図には、不透過壁に作用する含田式により算定した波力 F_{0x} と実験値 F_x の比 F_x/F_{0x} を示した。比は 0.6 程度になっている。これは式 (4.1) のように空隙を考慮した含田式により求めた値のさらに 0.8 倍となっている。

$$F_d = (1 - \varepsilon) F_0 \quad (4.1)$$

結局重複波領域のスリットに作用する水平波力は空隙率の変化による影響が大きく、次式で表わされると考えられる。

$$F = \lambda (1 - \varepsilon) F_0 \quad (4.2)$$

ここに λ は空隙率等に依存する低減係数である。また揚圧力については $P_z = 0.1 w_0 H$ 程度であり、ほとんど無視することができる。以上の結果は非碎波の条件の下でのものであるが、碎波領域については現在検討中である。耐波設計を行う際には、当然碎波時についての検討も必要となり、その場合式 (4.2) 中の λ の値が変化することも考えられる。また、この構造物はその特性上多くの部材で構成される。このため部材に対する設計を行う場合にはその衝撃力が問題となることも考えられる。このため全体の安定性のみでなく部材に対する衝撃力についても検討する必要がある。

スリット式の構造として図 4.3 の鳥瞰図には、杭間をブロックで連結する場合を示した。この他に、スリット付きのケーソンを作り固定する方法も考えられる。両者とも機能的には違いがない。ただしケーソン式は床版があるため揚圧力を考慮しなければならない。杭とブロックによる工法は大規模な作業船を必要としない等の利点があるが、高い杭打ち精度を要求される。これに対し杭とケーソンの場合には杭とブロックによる場合ほどの杭打ち精度は要求されないが、大規模な作業船が必要である。このように、工法については実際の作業地点の状況により優劣はつけ難い。

4.4.2 透過水平板付きスリット式構造物

透過水平板付きスリット式構造物の鳥瞰図および模式図を図 4.8, 4.9 に示す。スリット式構造物の消波機能に加え、透過水平板からの上下方向の鉛直噴流による乱れによって消波する。考慮すべきパラメータはスリット式の場合のほかに、水平板の空隙率 ε_{II} および水平板の没水深 R である。水平板の没

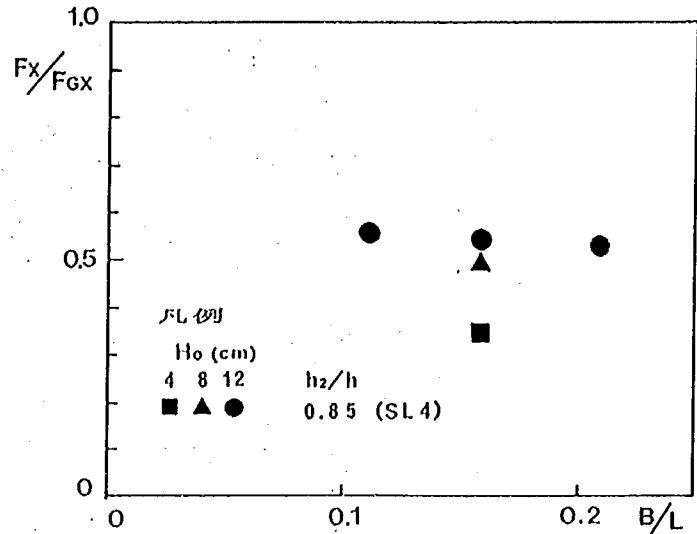


図 4.7 スリット式構造物の波力

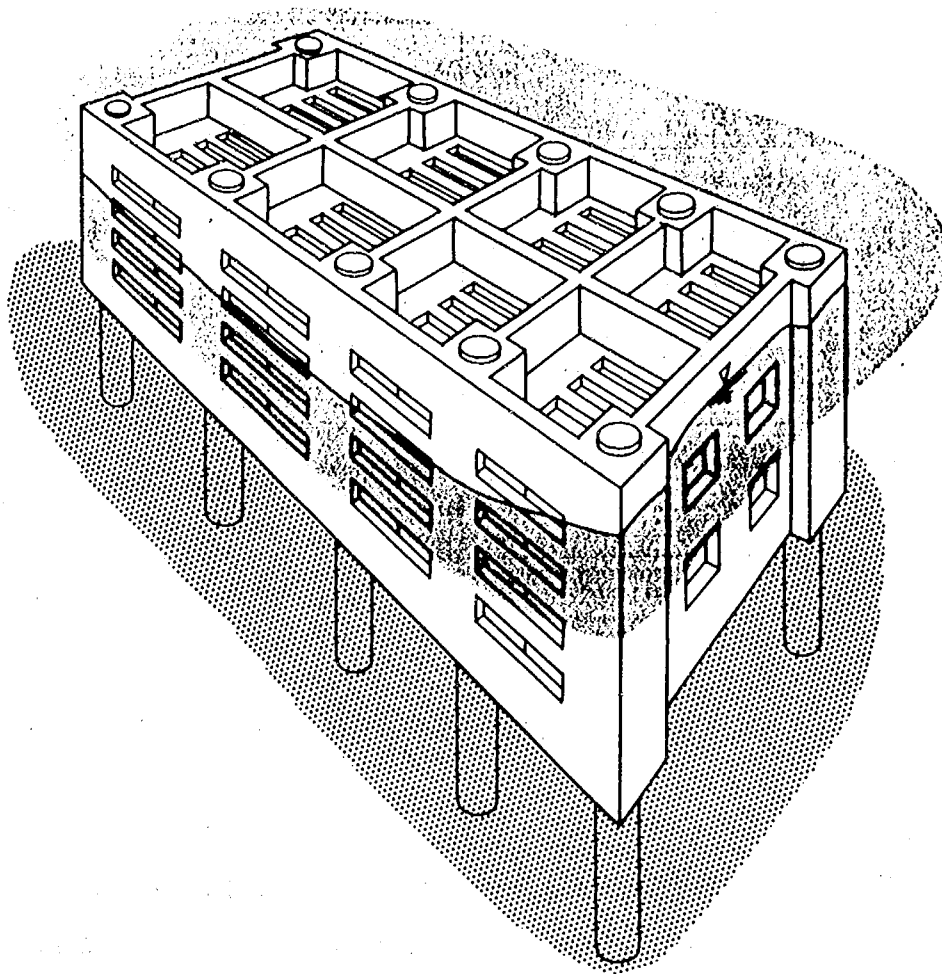


図 4.8 透過水平板付スリット式構造物の鳥瞰図

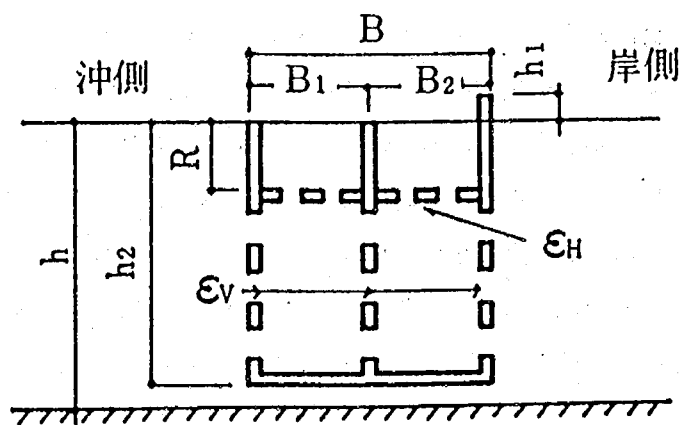


図 4.9 透過水平板付スリット式構造物の模式図

水深は消波効果と波力特性を考慮すると、 $R/h=0.1 \sim 0.15$ 程度とすることが過当であると考えられる。水平板の設置による消波効果の変化を図4.10に示す。図には不透過の水平板と透過水平板のほかに水平板のな

いスリット式の場合も併せて示した。水平板を設置することで B/L の大きい範囲で反射率が大きくなり、透過率が小さくなることがわかる。反射率は B/L の増大に伴って大きくなる。しかし水平板に空隙を設けることで $B/L = 0.3$ の場合、反射率を約 0.2 下げることができる。このとき透過率の上昇は 0.1 程度である。吃水比 h_2/h を変えた場合の K_T 、 K_R の変化を図

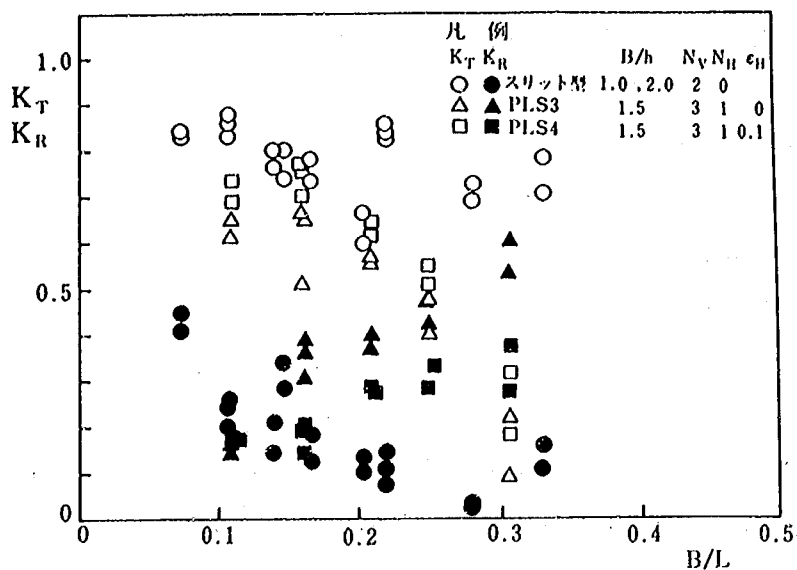


図 4.10 透過水平板付スリット式構造物の K_T 、 K_R と B/L の関係

4.11 に示す。図は $\epsilon = 0.26$ 、 $\epsilon_H = 0.18$ で天端が静水面位置の場合を示した。 h_2/h を大きくすると B/L が小さい範囲で K_T が減少している。良好な消波効果を与える構造諸元の目安は、相対幅 $B/L > 0.1$ 、吃水比 $h_2/h = 1.0$ 、 $R/h = 0.1$ 、 $\epsilon_H = 0.18$ である。

次に波力特性について述べる。重複波領域における水平方向波力は、スリット式と同様に空隙を考慮した合田式に低減率を乗じた形で便宜上表わすことができる。 $\epsilon = 0.4$ の場合、式 (4.2) における λ は 0.8 程度である。これに対し揚圧力は水平板があるため無視できない。透過性の水平板であるため、不透過の水平板の揚圧力よりも

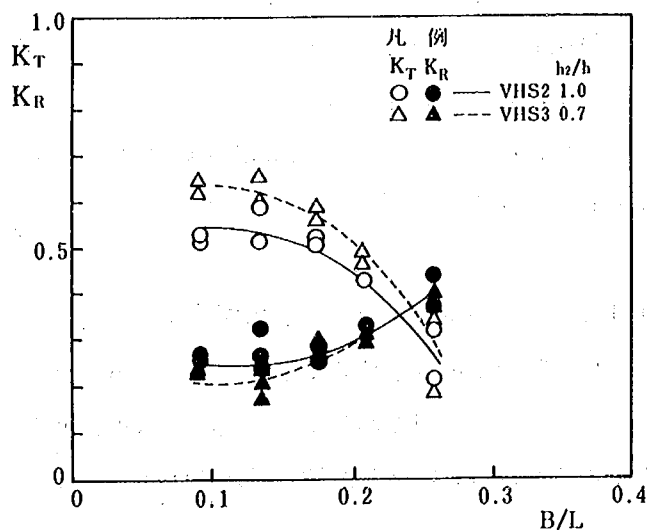


図 4.11 透過水平板付スリット式構造物の K_T 、 K_R と B/L の関係
(吃水比 h_2/h をパラメータとする)

小さくなると考えられるが、実験等により算定する必要がある。また水平板の設置位置によっては水平板に大きな波力が作用することが考えられる。また砕波時の波力については部材に対する衝撃力も含めてスリット式と同様現在検討を行っている。本構造物についても、スリット式と同様に、構造形式として杭とブロック、杭とケーソンの 2 タイプが考えられる。

以上、杭構造物の代表と考えられる 2 タイプについて説明した。図 4.2 に示したフロー図では、消波特性が明らかになり耐波安定性 (I) (波力) についての検討が進行している段階にある。また周辺に及ぼ

す影響については単堤を設置した場合の波高分布、流況、地形変化について実験および数値シミュレーションによって検討中である。このほか杭構造物について上記2つの構造物に共通の問題と考えられる点を以下に示す。

① スリット空隙間の生物付着

生物付着量によっては空隙率が小さくなることが考えられる。またその結果として波力は増大する。

② 大規模洗掘

杭構造物の特性であるかどうかは不明であるが、駿河海岸沖に設置してある杭構造物である海洋技術総合研究施設周りでは半径50m程度の洗掘が観測されている。図4.12には1986年5月28日および同年7月1日に行った深浅測量の結果を平面図で示した。洗掘深としては2m程度である。現在更に調査中であるが局所洗掘ではなく波の変形にまで影響を与えるような現象であるため重要である。

③ 杭の変形を考慮した設計法

海域制御構造物の特徴の1つとして、他の構造物に比べて許容できる変位量大きいことが挙げられる。このため杭の変形あるいは地盤の塑性変形を考慮すれば経済的な設計を行うことができる。

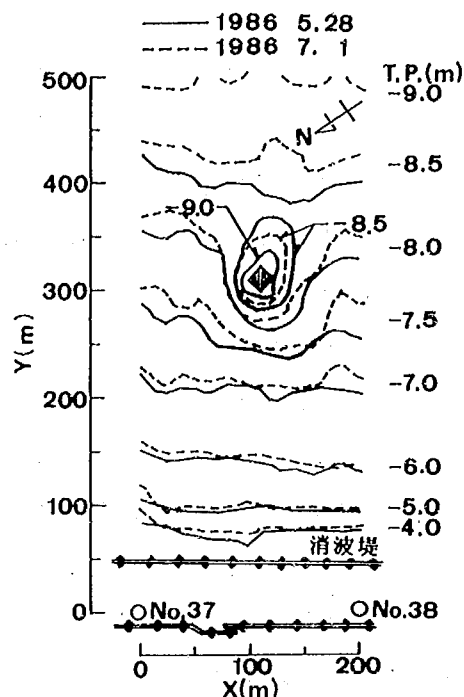


図4.12 海洋施設周りの洗掘

4.4.3 フレキシブルマウンド式構造物

可撓性の膜の中に水を詰めた構造である。図4.13、4.14にその完成想像図の例および模式図を示す。可撓性の膜が変形し入射波と逆位相の波を発生させることで消波を行う。同様な形態の潜堤を剛体で作った場合、その消波機構は人工リーフと同様であり、

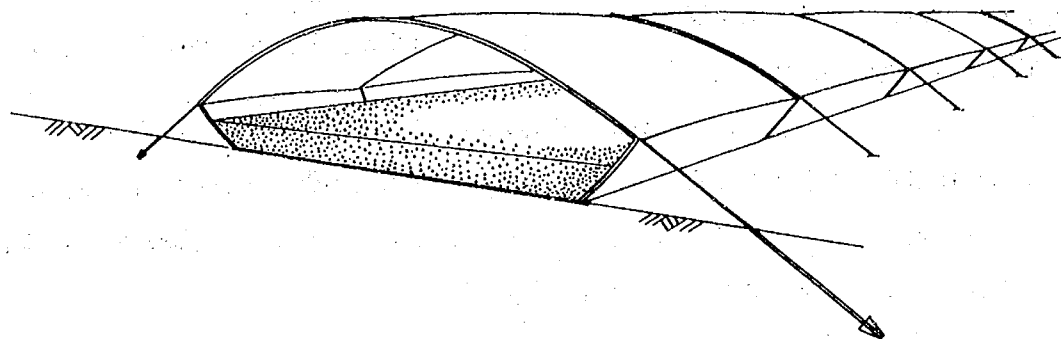


図4.13 フレキシブルマウンドの完成想像図

砕波によってエネルギーを消散させるものである。この場合、波高天端水深比を $R/H_0 < 1.3$ 程度とする必要がある。これに対し可撓性にして膜が変形することを許すと R/H_0 が大きくても良好な消波効果が期待できる。剛体の場合と可撓性の場合の R/H_I による

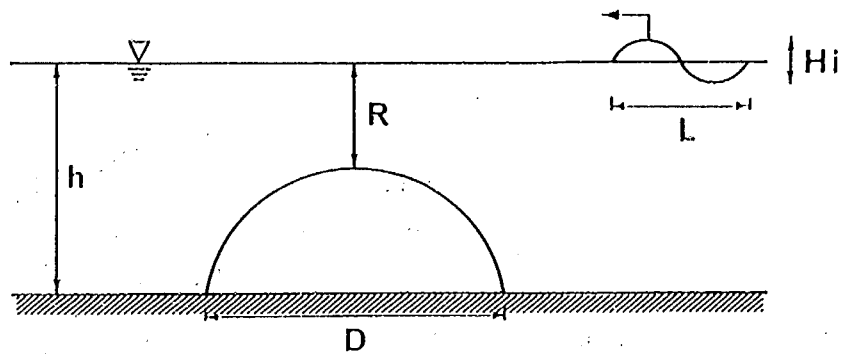


図 4.14 フレキシブルマウンドの模式図

透過率 K_T の変化を図 4.15 に示す⁴⁾。剛体の場合は $R/H_I = 2.3$ では全く消波効果がない。一方、可撓性の場合 $R/H_I = 2.0$ でも適当な D/L の値をとれば $K_T = 0.4$ 程度にできることが分かる。消波特性は内部流体の付加水圧 ΔP 、膜材の剛性、内部流体の粘性等によって異なってくると考えられ、その特性、主要因の検討を現在行っている。

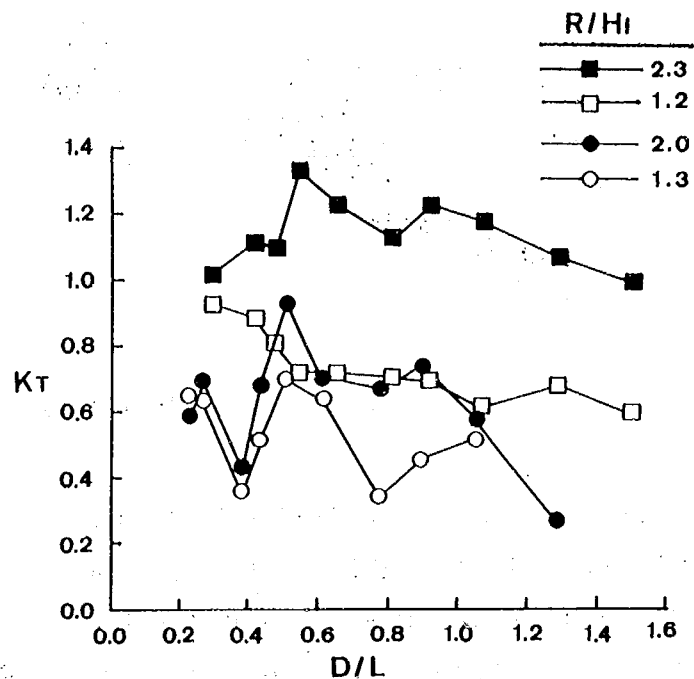


図 4.15 フレキシブルマウンドの K_T と D/L の関係

現地に設置した場合の想像図を図 4.13 に示したが、施工に至るまでには固定方法および疲労等についての種々の検討が必要である。また全波力についても今後検討が必要である。しかしゴムやジオテ

キスタイル等の膜材があれば、内部は海水または土砂で良いため、コスト的には安価になると考えられる。また没水型であることから景観に対しても問題がなく、海域制御構造物として十分開発の可能性があるとと言える。

4.4.4 斜板消波潜堤

図 4.16, 4.17 にその概念図および模式図を示す。天端が傾斜した中空のケーソンが水面下に没している構造物である。このタイプでは、斜板上で砕波を起してエネルギーを損失させる。長周期の波に対する消波性能を向上させるために、斜板上に栈粗度を設け砕波を促進させている。また砕波後の水塊が堤体の岸側に落ち込み、透過率が増大することを避けるために、斜板後部に開口部を設けた。ここから取り込まれた水塊は、前面に設けられた開口部より流れとなって堤外に放出される。基本構造である斜板のみの場合 (P 型) と、栈粗度、斜板後部および前面に開口部を設けた場合 (C 型) の透過率 K_T 、

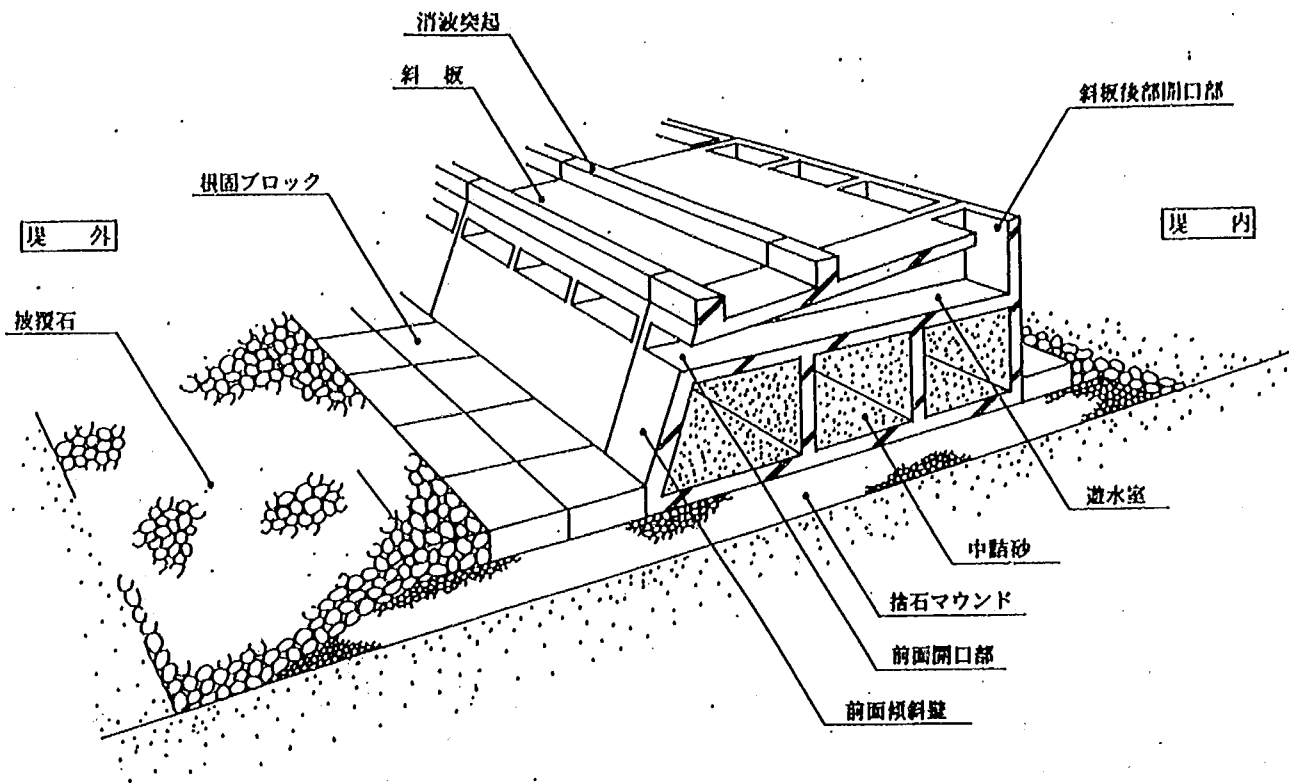


図 4.16 斜板消波潜堤の鳥瞰図

反射率 K_R の B/L による変化を図 4.18 に示す。両者とも斜板の没水深と水深の比 R/h は 0.1, 斜板の勾配 $i_B = 1/10$ である。C 型のほうが B/L が小さい範囲で K_T が小さくなり, その差は 0.4 にもなる。反射率は両者ともあまり変化しない。結局, C 型とすれば, $R/h = 0.1$, $i_B = 1/10$ の構造条件で $T = 1.2 \sim 2.8$ s の広い範囲の波浪条件に対して $K_T < 0.6$, $K_R < 0.5$ 程度の消波効果を持つ。前面開口部の位置は洗掘等への影響を考えれば高くした方がよい。この場合消波効果に大きな変化がないことが実験で確かめられている。

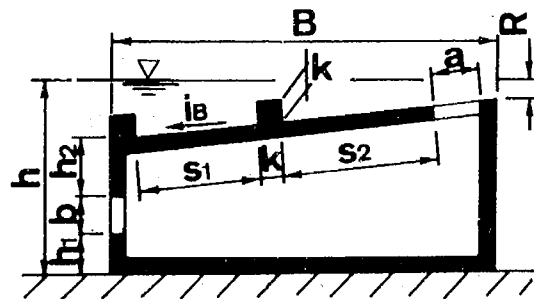


図 4.17 斜板消波潜堤の模式図

構造物としては重力式が考えられるが, 杭式でも可能である。重力式の場合, 堤体の受ける波力によって安定性の点からどれほどの重量が必要であるかが決まる。この結果によってケーソン内の空間を小さくすることとなる。このため波力低減のための対策工が必要となる。波力低減対策として, 揚圧力を低減させるため床版から斜板上に開口部を設けるか, 水平力を低減させるために堤体前面を傾斜させるか, あるいはその両方の方法が考えられる (図 4.19)。堤体の安定性について 1/100 縮尺の 2 次元滑動実験を行った結果, 消波機能を大きく変えない程度に中空部を残したまま重力式として実現可能な構造物とするめどがたった。現在, 構造物に作用する波力を 1/25 縮尺の模型実験により測定し, 波力低減対

策工の最適化を行っている。この実験結果より斜板消波潜堤に作用する波力算定法も明らかになる。本構造物の特徴は、斜板の天端高を $R/h = 0.1$ 程度に設定するため H.W.L. 時よりも L.W.L. 時に受ける波力が大きくなることである。栈粗度に作用する衝撃力等も問題である。最終的には波力低減対策工を設けたあとの構造物について、当初と同様な消波効果が得られるか否かを確認する必要がある。重力式構造物を考える場合、杭式のような大規模な洗掘が起こるかは不明である。しかし局所洗掘であっても、洗掘そのものが直接機能に対して大きく影響を与えるため洗掘範囲についての検討および対策方法の検討が必要である。

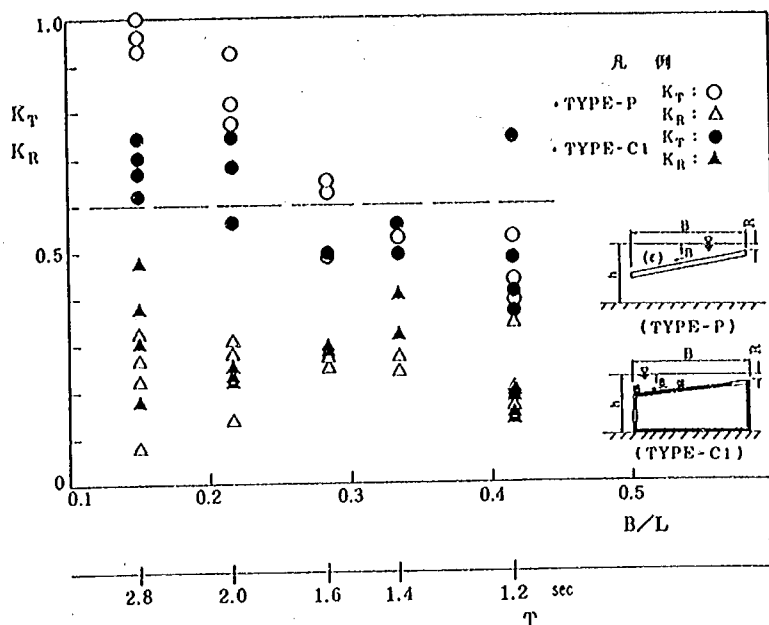


図 4.18 斜板消波潜堤の K_T , K_R と B/L の関係

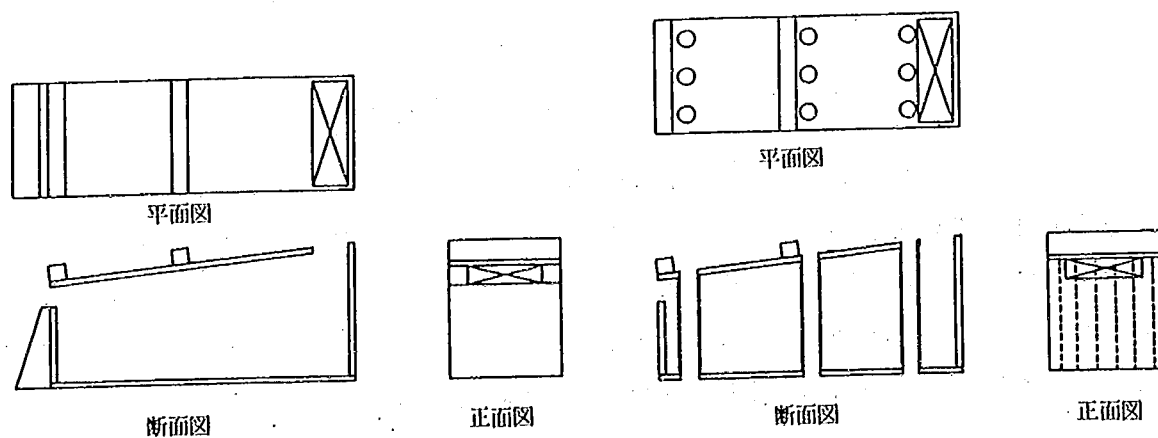


図 4.19 斜板消波潜堤の波力低減対策工

4.4.5 複合消波式構造物

複合消波式海域制御構造物の概念図および平面図、側面図を図 4.20, 4.21 に示す。断続的に並べた水平板の上に Y 字型の垂直板を設けたもので、波エネルギーを流れに変換するため、強い海水交換機能を持つ。短周期波は水平板上の碎波により消波する。長周期波は Y 型垂直板間の波の収斂効果と、Y 型垂直板で形作られている V 型遊水部による渦の形成により消波するものである。V 型遊水部近傍の流れ

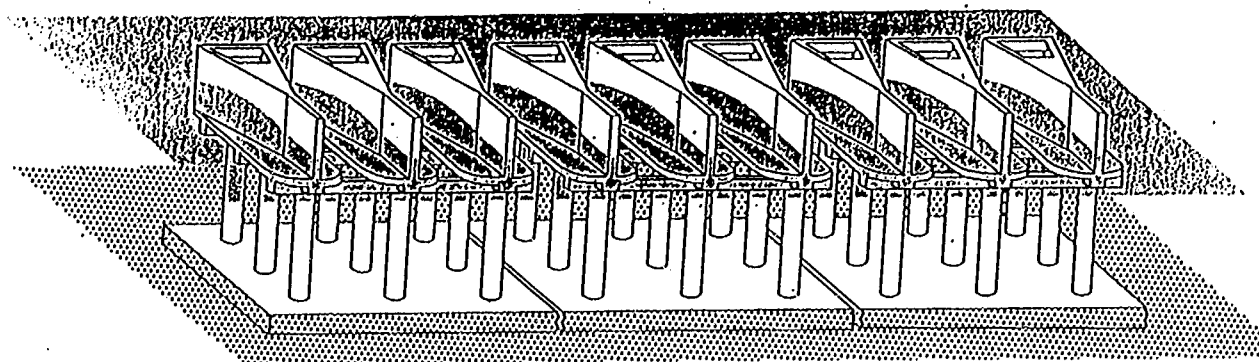


図 4.20 複合消波式構造物の鳥瞰図

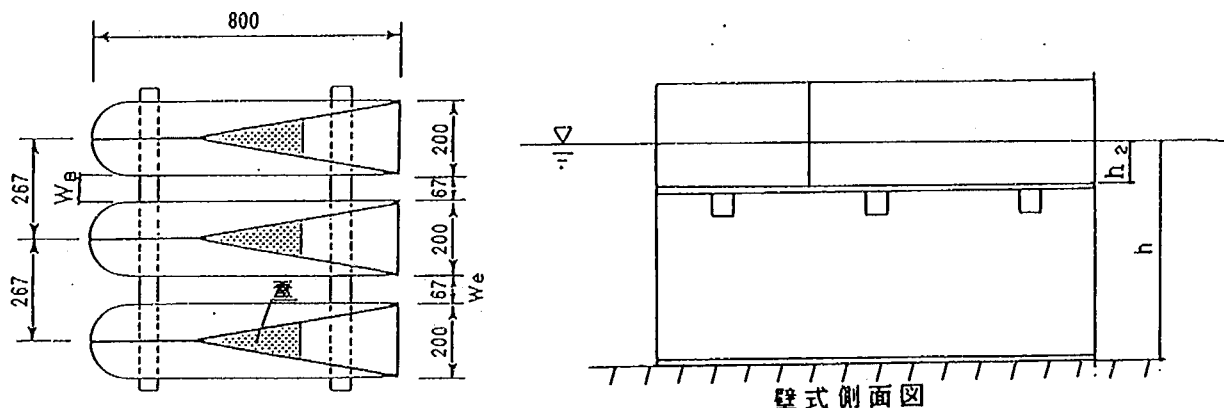


図 4.21 複合消波式構造物の正面図，断面図

と渦の状況を図 4.22 を用いて説明する。入射波の峰が模型後端部に達すると、Y 型垂直板後端部の間隔より波の進行方向に強い吹き出し流れを生ずる (①)。その水の一部は V 型遊水部との水位差および流速差等によって水平方向の渦 (②) と鉛直方向の渦 (③) を発生し、逆方向の流れとなって V 型遊水部へ導かれる (④)。次に、入射波の谷が模型後端部に達すると、逆方向の流れ (④) は V 型遊水部の内部で反射され、後方へ吹き出す流れを生じる (⑤)。この流れは入射波との水位差および流速差等によって水平方向の渦 (⑥) と、鉛直方向の渦 (⑦) を発生する。消波効果に最も影響を及ぼすパラメータは水平板の間隔および Y 型垂直板の開き方である。Y 型垂直板の開閉角が 11° の場合を A タイプ、 21° の場合を B タイプとする。図 4.23 に水平板の没水深と水深の比が $h_2/h = 0.2$ の場合で、A、B 両タイプについて一定の沿岸方向距離（現地換算で 15m）の中に Y 型垂直板が 2 体と 3 体の場合（A-2、A-3 および B-2、B-3 タイプ）の透過率 K_T 、反射率 K_R と B/L の関係を示した。 K_R は 0.2 程度でどのタイプも余り変化しない。 B/L が大きくなると K_T はゆるやかに減少するが B-3 タイプとすれば $0.2 < B/L < 0.6$ の範囲で透過率 $K_T < 0.6$ とすることができる。また、水平板の没水深比が消波効果に及ぼす影響は短周期では碎波によるエネルギーロスが大きいため没水深は浅い方が K_T は小さく、

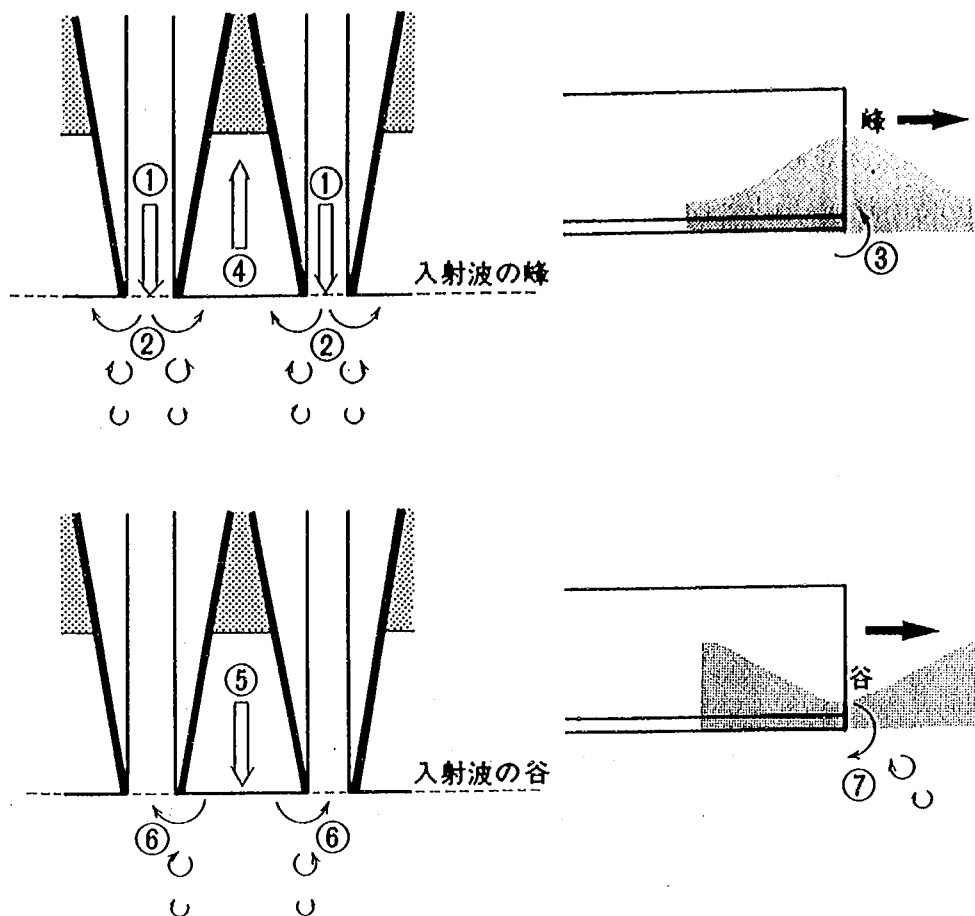


図 4.22 流れおよび渦の発生機構の説明図

長周期では逆に V 型遊水部の効果が大きい
ため、没水深はある程度
大きい方が K_T は小さ
くなる傾向がある。ま
た、周期により透過率
を極小にする V 型遊水
部の奥行き方向の長さ
がある。

構造形式としてはケ
ーソン式を想定してい
るが、上記の機能を持
つ上部工を支える下部

工としては、図 4.20 に示した柱タイプの他に壁タイプが考えられる。

構造物に作用する水平方向波力は、波高が大きくなると増大するが、単位波高当たりの波力に換算する

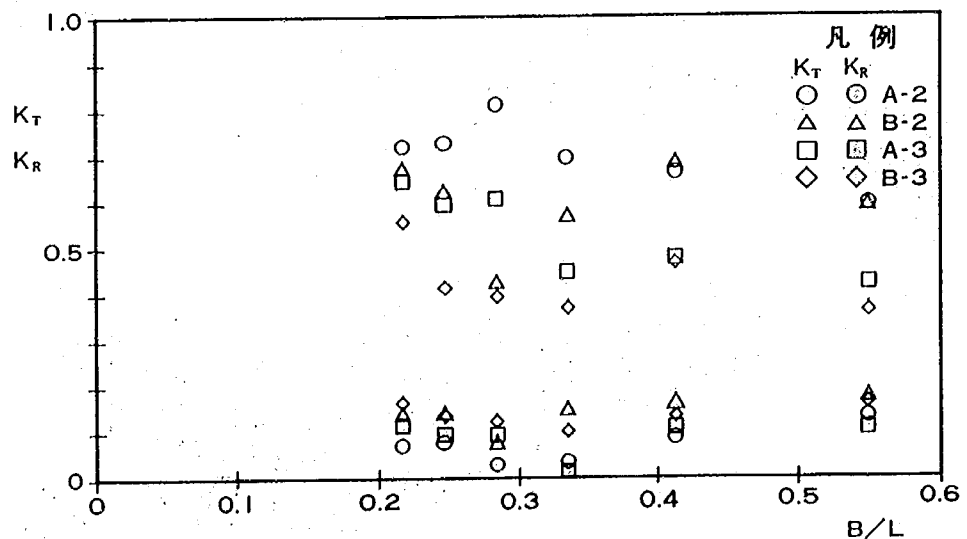


図 4.23 複合消波式構造物の K_T , K_R と B/L の関係

と波高が大きくなるにつれて小さくなる。

本構造物は重力式を考えているため、洗掘に対する予測および対策が必要となる。これは、斜板消波潜堤で述べたとおりである。また、複合消波式構造物は指向性の強い構造物であるため斜め入射波に対する効果およびその時の波力についての検討が重要である。

4.4.6 根入れ式鋼板セル構造物

根入れ式鋼板セル構造物の概念図を図 4.24 に示す。根入れ式鋼板セルを一定間隔を開けて施工し、主に波の反射とセル間の急縮急拡により消波するものである。このままでは反射が強いため前面を遊水部にする必要がある。その断面図および正面図を図 4.25 に示した。 $b/D = 0.2$ の場合の K_T 、 K_R と H/L の関係を図 4.26 に示す。遊水部を設けない場合（基本タイプ）は H/L が小さい範囲で $K_R > 0.5$ と大きい。遊水部を設けることで $K_R < 0.5$ となることが分かる。またこのとき透過率も 0.1 程度減少する。最も重要なパラメータはセル間隔とセル径の比 b/D で $b/D = 0.2$ としないと良好な透過率が得られない。前面遊水部については深さによって K_R を極小にする開口率がある。波力は、スリット式と同様に合田式との比較によって考えられるがセル間隔比、遊水部の諸元によって変化する。

工法としては、根入れ式鋼板セル工法として確立されている。しかし遊水部の部材の耐力等に問題があり、衝撃圧がかかるような状況での検討が必要である。

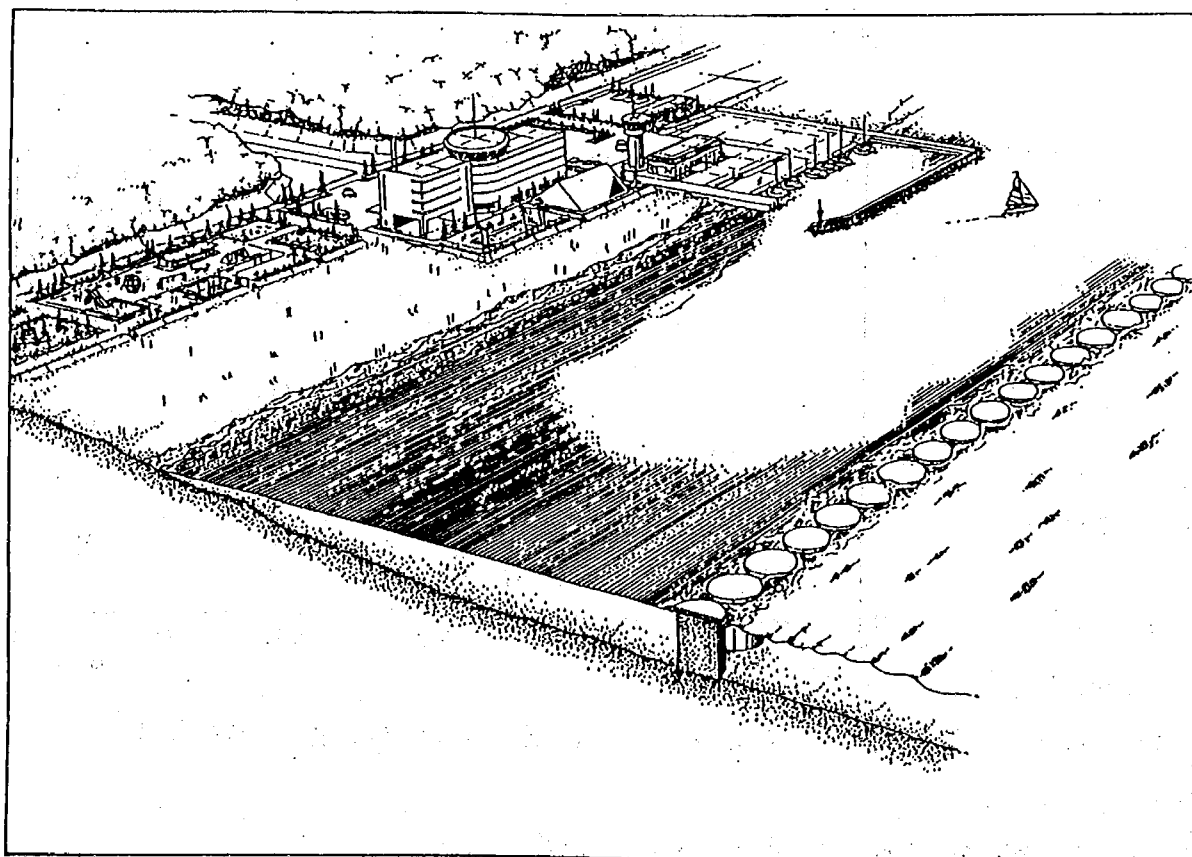


図 4.24 根入れ式鋼板セル構造物の鳥瞰図

また単堤で前面遊水部のない場合については構造物設置による流況、波高分布、地形変化等が移動床実験によって確認されている。⁵⁾ 構造物周辺では透過部から岸側に向かう流れがあり、海水交換機能があること、また汀線付近では従来の離岸堤と同様にトンボロが形成されることが分かった。

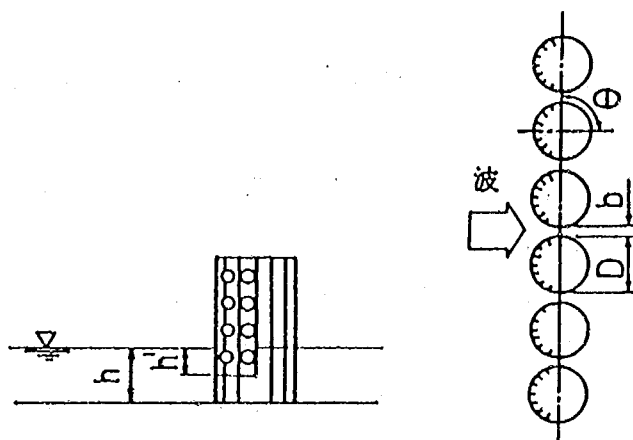


図 4.25 根入れ式鋼板セル構造物の平面図，断面図

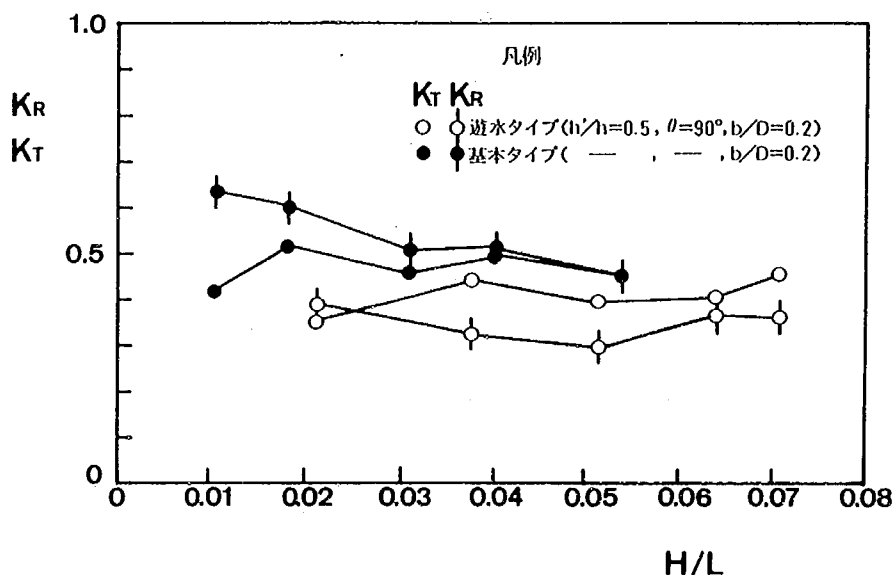


図 4.26 根入れ式鋼板セル構造物の K_T 、 K_R と H/L の関係

4.5 まとめ

代表的な6つのタイプの海域制御構造物について、その開発の現状について述べた。海域制御構造物としてはこの他にもいくつかのタイプが考えられる。各構造物ともその消波効果については、ほぼ明らかになっている。今後、耐波安定性、周辺への影響の点に重点をおき開発を進めていく必要がある。また、現在の技術でも施工可能な構造物もあるが、施工段階には至っていないものなど、各々開発段階には違いがあるが今後順次総プロの中で検討していく予定である。

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，No 2454，173p.，1987.
- 2) 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 (2)，土木研究所資料，No 2510，138p.，1987.
- 3) 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 (3)，土木研究所資料，No 2511，167p.，1987.
- 4) 田中正博他：フレキシブルマウンドの消波特性に関する実験的検討，第34回海岸工学講演会論文集，pp.492～496，1987.
- 5) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：根入れ式鋼板セルに関する共同研究報告書，土木研究所資料，No 2 435，89p.，1987.

第5章 海域制御構造物に作用する 波力の特徴

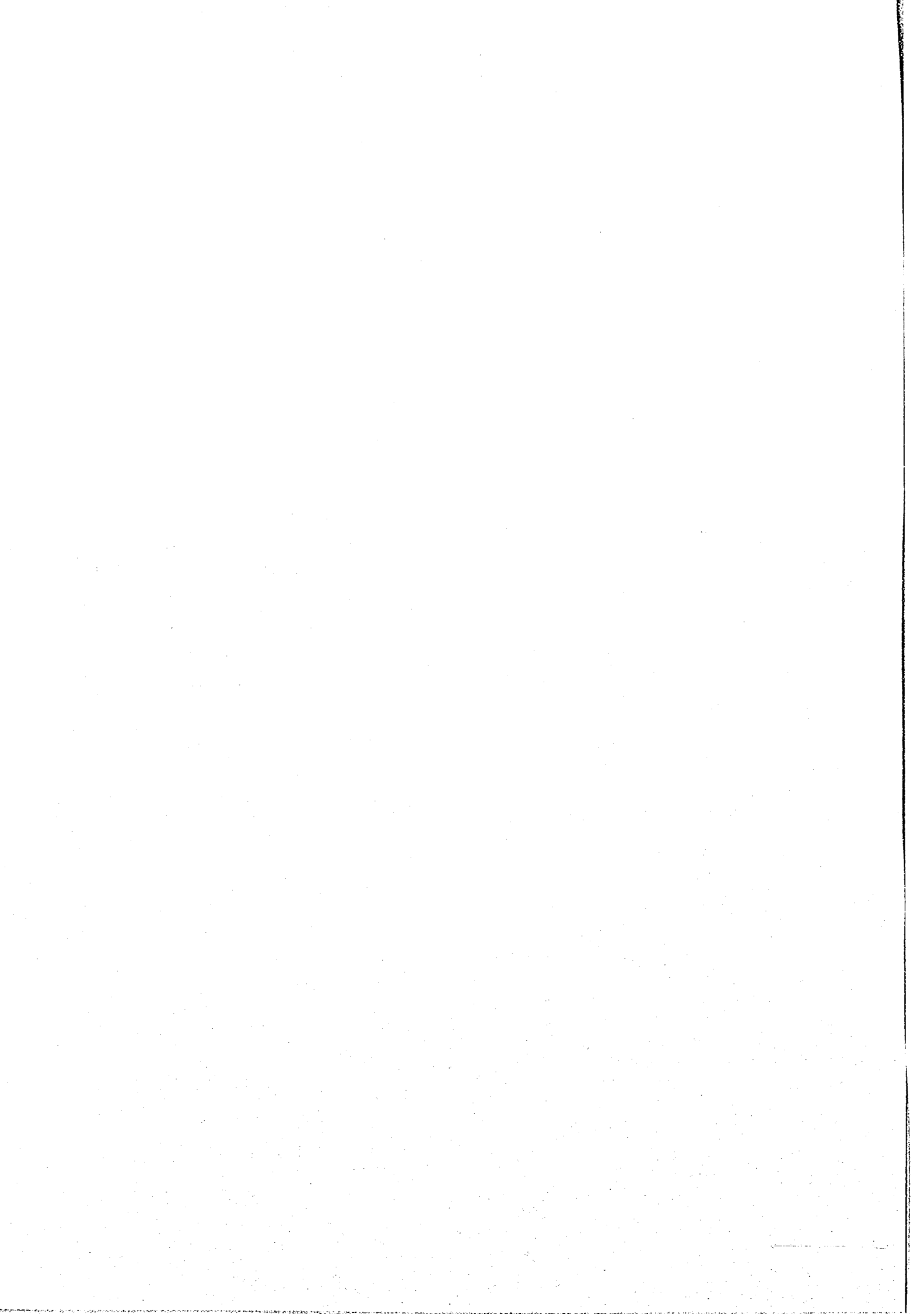
建設省土木研究所海岸研究室 室長 宇多 高明

研究員 村井 禎美

部外研究員 藤原 隆一

飛島建設(株)(前建設省土木研究所海岸研究室部外研究員)

松尾 和男



5.1 まえがき

海洋構造物に作用する波力は、構造物の形態、海底地形、設置水深、波の諸元により大きく変化する。海域制御構造物のように波のエネルギーの一部を伝達させる透過性構造物に作用する波力については、理論的、実験的に数多くの研究が行われている。しかし、構造形態による作用波力の違い、砕波力および砕波後の波力については不明な点が多い。したがって、構造物に作用する波力を求める場合には模型実験によることが望ましい。

本研究では、種々の海域制御構造物模型の中から、4種類を選び、2次元水理模型実験を行って構造物に作用する波力について検討した。構造物のタイプはスリット式、ハイブリッド式、立体トラス式、パイプ式の4種類である。波浪条件は造波装置の性能から非砕波の領域に限った。また、従来の波力算定式と比較するため、水平波力については合田式、モリソン式により計算した波力、鉛直波力については水平板に作用する揚圧力との比較を行った。

5.2 実験方法

4種類の構造物形態を模型諸量とともに、表5.1に示す。実験の縮尺は1/25とし、フルードの相似則にしたがい模型の諸元を定めた。各構造物の消波原理を以下に示す。スリット式は複数配列されたスリット板を波が通過するとき乱れを生じさせて消波する。また、前、後列のスリットより反射する波を互いに干渉させることにより反射波を消す。この模型の消波の原理は波の反射と乱れの生成によるエネルギー減衰である。ハイブリッド式は、スリット式の遊水部に自立式の消波ブロックを詰めたものであり、波の通過の際の乱れによりエネルギー逸散をひき起こす。立体トラス式は、小さな円板のついた部材を立体トラス構造として構成したものであり、多数の円板により渦を発生させ、これにより波のエネルギー減衰を図る。パイプ式は、断面形状、長さが同じパイプを、波の入射方向に向けて多数配置したもので、波がパイプを通過するとき流れが変わるとともに、急縮、急拡および摩擦によりエネルギーを損失させる。

波力測定は、三分力計に模型を固定して図5.1に示す実験装置を用いて行った。測定項目は水平および鉛直力、回転モーメント、模型前面の水位変化である。三分力計は模型の中心、容量式波高計は模型の前面から沖側に20cm離れた地点に設置した。波浪条件を表5.2に示す。この条件のもとで、周期は実用上十分な範囲を含んでいると考えられるが、波高については砕波領域までは含んでいない。なお、今回の作用波浪は前報¹⁾で述べた消波実験で用いたものである。これらの波浪作用下における各構造物の透過率(K_T)、反射率(K_R)を同じく表5.2に示す。このように、各構造物で消波効果は異なるため、今回の実験により得られた波力特性を各構造物間で比較することは適切ではない。したがって、主に各構造物の波力特性を示すことにする。なお、ハイブリッド式は、自立した消波ブロックがスリット

間でスリット板と接触せずに中詰されているほかはスリット式と全く同一形状である。中詰ブロックの存在によってスリットに作用する波力が減少する。ハイブリッド式はこの減少の程度を把握するために選んだものである。

表 5.1 構 造 物 諸 元

構 造	実験模型諸量	模 式 図
スリット式 構造物	スリット枚数 $N=2$ $h=40\text{cm}$ $\epsilon_1=0.4$ $h_2/h=0.7$ $\epsilon_2=0.4$ $B/h=2.0$ $h_1/h=0.5$	
ハイブリッド式 構造物	スリット枚数 $N=2$ $h=40\text{cm}$ $\epsilon_1=0.4$ $h_2/h=0.7$ $\epsilon_2=0.4$ $B/h=2.0$ 異形ブロックの $h_1/h=0.5$ 空隙率 0.47	
立体トラス式 構造物	$h=40\text{cm}$ $h_2/h=0.25$ $B/h=1.0$ $h_1/h=0.5$	
パイプ式 構造物	$h=40\text{cm}$ $h_2/h=0.21$ $B/h=2.0$ $d/h=0.055$ $h_1/h=0.5$	

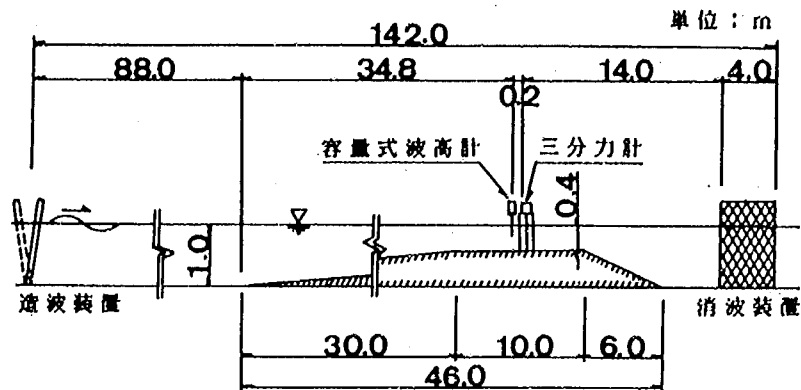


図 5.1 実験装置

表 5.2 各構造物の透過、反射率

ケース 番号	波浪条件		スリット式		ハイブリッド式		立体トラス式		パイプ式	
	$H_0' (cm)$	$T(s)$	K_T	K_R	K_T	K_R	K_T	K_R	K_T	K_R
1	12	1.6	0.73	0.03	0.25	0.52	0.78	0.15	0.64	0.46
2	8	2.0	0.84	0.14	0.33	0.54	1.02	0.16	0.65	0.35
3	12	2.0	0.81	0.07	0.25	0.49	0.97	0.17	0.59	0.35
4	16	2.0	0.79	0.25	0.25	0.59	0.88	0.14	0.61	0.41
5	12	2.8	0.73	0.34	0.26	0.51	0.79	0.12	0.55	0.33

5.3 水平、鉛直波力に関する予備的検討

5.3.1 合田式、モリソン式による水平波力の算定

実験を行った構造物は透過性を有する。そのため構造物に作用する波力は、波の進行を完全に阻害する不透過壁に作用する波力と、杭のような構造物への波力との中間的な値を示すと考えられる。なお、透過性構造物に作用する波力については不明な点が多い。本来は、構造物内の水面形等を考慮した波力特性を論ずるべきであるが、本研究では構造物内、構造物より岸側の水位の測定を行っていない。したがって、比較のため消波構造部に作用する波力を合田式に準じて算定し、下部工はモリソン式により波力を計算した。そこで、まず水平波力について消波構造部と下部工に分けて波力の計算を行った。

合田式による波力計算は次に示す仮定のもとで行った。スリット、ハイブリッドおよびパイプ式模型の場合、空隙率を考慮する。空隙率 ϵ を考慮した波力 F_0' は合田式で求める波力を F_0 として次式のよ

$$F_0' = (1 - \epsilon) \cdot F_0 \quad (5.1)$$

次に、モリソン式による波力 F_T は抗力 F_D 、慣性力 F_M の和として次式で表わされる。

$$F_T = F_D + F_M \quad (5.2)$$

$$F_D = C_D w_0 |u| u / 2g \cdot A \quad (5.3)$$

$$F_M = C_M w_0 / g V (\partial u / \partial t) \quad (5.4)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数、 A は水粒子速度 u 方向への物体の投影面積、 V は物体の体積である。また、 w_0 は水の単位体積重量、 g は重力加速度である。計算における抗力係数、質量係数は正角柱の値とし、 $C_D = 2.05$ 、 $C_M = 2.19$ を用いる。

以上の計算結果を表 5.3 に示す。

表 5.3 合田式、モリソン式による水平波力

スリット式

H_0' (cm)	T (s)	F_G' (kg)	F_T (kg)	$F_G' + F_T$ (kg)	$\frac{F_G'}{F_G' + F_T}$
12	1.6	11.21	0.18	11.39	0.98
8	2.0	8.04	0.10	8.14	0.99
12	2.0	13.05	0.16	13.21	0.99
16	2.0	18.59	0.24	18.83	0.99
12	2.8	17.39	0.15	17.54	0.99

ハイブリッド式

H_0' (cm)	T (s)	F_G' (kg)	F_T (kg)	$F_G' + F_T$ (kg)	$\frac{F_G'}{F_G' + F_T}$
12	1.6	10.10	0.18	10.28	0.98
8	2.0	7.58	0.10	7.68	0.93
12	2.0	14.89	0.16	15.05	0.99
16	2.0	17.62	0.24	17.86	0.94
12	2.8	17.38	0.15	17.53	0.99

立体トラス式

H_0' (cm)	T (s)	F_G' (kg)	F_T (kg)	$F_G' + F_T$ (kg)	$\frac{F_G'}{F_G' + F_T}$
12	1.6	9.25	—	9.25	1.00
8	2.0	6.16	—	6.16	1.00
12	2.0	11.76	—	11.76	1.00
16	2.0	16.75	—	16.75	1.00
20	2.8	15.83	—	15.83	1.00

パイプ式

H_0' (cm)	T (s)	F_G' (kg)	F_T (kg)	$F_G' + F_T$ (kg)	$\frac{F_G'}{F_G' + F_T}$
12	1.6	4.03	0.59	4.62	0.87
8	2.0	2.93	0.32	3.25	0.90
12	2.0	4.72	0.56	5.28	0.89
16	2.0	7.52	0.90	8.42	0.89
12	2.8	6.28	0.54	6.82	0.92

下部工に作用する波力は 4 本の杭
おのおのに作用するので、単位幅
当りの波力に整理すると理解しに
くなる。以下、波力は水路幅 60
cm 当りの値として示す。表 5.3 の
 $F_G' / (F_G' + F_T)$ によれば、
模型に作用する全波力の中で消波
構造部に作用する波力が卓越して
いる。したがって、全波力の特性
は消波構造部に作用する波力の特
性に支配されていると考えられる。

5.3.2 水位変動に伴い構造物 に作用する力

波が構造物を通過する際、水位
の変動に伴い浮力が変化する。す
なわち、水位が静水面にある時の
浮力を基準に考えると、水位が静
水面よりも上にある場合、鉛直上
向きの浮力が構造物に作用する。
逆に、水位が静水面より下にある
場合、浮力に相当する力が鉛直下
向きに作用する (図 5.2 参照)。

したがって、三分力計で測定した
鉛直合力は波力のほかに上述の結
果生ずる力が加わっている。また、
パイプ式構造物では波の峰が通過
した後もパイプ内に水が残留する。

このためパイプ内の残留水の重量も加わる。ここでは各構造物に作用する浮力の変動を以下の方法で算定する。各部材の単位高さ当りの体積を V 、水の単位体積重量を w_0 とすれば水位変動に伴い構造物に作用する単位高さあたりの力 f_1' は

$$f_1' = \pm w_0 V \quad (+ \text{鉛直上向き}, - \text{鉛直下向き}) \quad (5.5)$$

となる。また、パイプ式構造物の単位高さ当りの残留水体積 $V_{p'}$ による力 f_2' は

$$f_2' = w_0 V_{p'} \quad (5.6)$$

となる。したがって、実験で得られた合力より式 (5.5), (5.6) を用いて構造物全体に作用する水位変動に伴う力を差し引く必要がある。

$$F_z' = F_z - \sum F_i' \quad (5.7)$$

ここに、 F_z' は鉛直波力、 F_z は鉛直合力であり、 F_i' は水位変動に伴うそれぞれの力を示す。一方、水平方向については水位変動に伴う浮力の変化は作用しない。したがって、水平合力は水平波力と等しい。

$$F_x' = F_x \quad (5.8)$$

ここに、 F_x' は水平波力、 F_x は水平合力である。

5.4 測定結果

5.4.1 水位と水平、鉛直合力および回転モーメントの関係

スリット式の場合の水平合力 F_x 、鉛直合力 F_z 、回転モーメント M_y および水位 η の経時変化の一例 ($H_0' = 12\text{cm}$, $T = 2\text{s}$) を図 5.3 に示す。添字 X , Y , Z は座標系を表わし、右手座標系で定義する。また、波が進行する向き、鉛直上向きをそれぞれ X , Z の正方向とした。 η は前面スリット板より沖側 20cm の地点で測定された水位である。周期 2s の波が水位測定点から前面スリット板までの水深 40cm の水平床を進むのに要する時間は約 0.11s である。このことを考慮に入れると、 η がほぼ最大となり、波の峰がスリット板に到達する時、 F_x は岸向き、 F_z は上向きの最大値となっている。次にこの点を詳細に調べるため、 η に対する F_x , F_z , M_y の位相遅れを図 5.4 に示した。この図は、沖波波高 H_0' を 12cm と固定し、周期を 1.6, 2.0, 2.8s と変化させた場合の結果である。位相遅れ τ の計算では水位測定

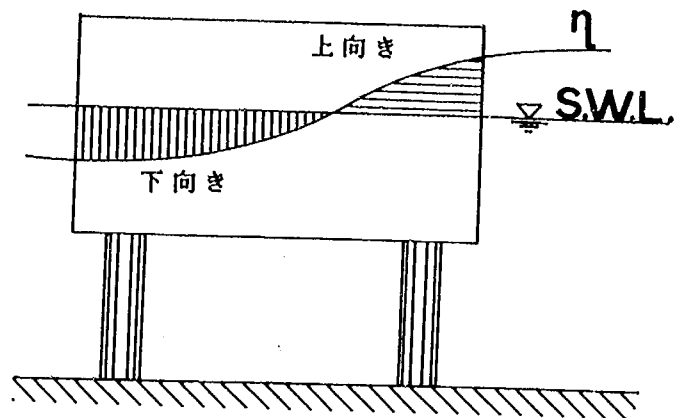


図 5.2 水位変動に伴い構造物に作用する力

点と構造物の間を波が進行する時間を差し引いている。全構造物で M_Y は F_X , F_Z より位相が遅れている。また、パイプ式の M_Y を除くと τ/T の範囲はほぼ $-0.1 \sim 0.1$ であり位相差は小さいといえる。すなわち、実用上 F_X , F_Z , M_Y の最大値は同時に生じていると考えて良い。

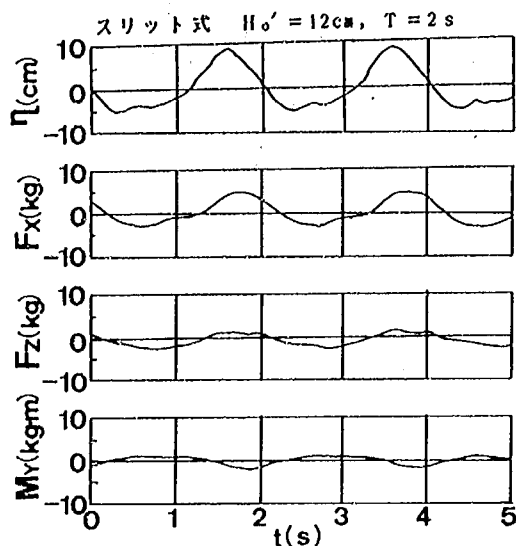


図 5.3 η , F_X , F_Z , M_Y の経時変化

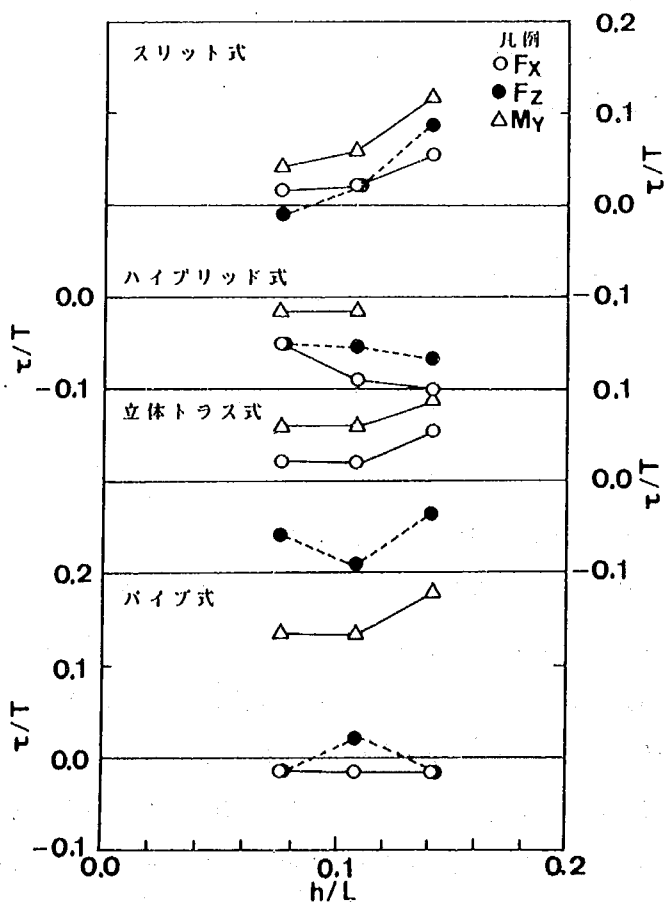


図 5.4 η と F_X , F_Z , M_Y の位相差

5.4.2 水平波力の検討

5.3.2 で示した合田式，モリソン式による波力算定値と水平波力の測定値の関係を図 5.5 に示す。これは周期を 2s と固定し，沖波波高 H_0' を 8, 12, 16 cm と変化させた場合の結果である。全ての構造物で岸向きの波力の方が沖向きよりも大きいことから，以下では岸向きの波力についてのみ論ずる。スリット式，ハイブリッド式の $F_X' / (F_G' + F_T)$ はそれぞれ 0.31 ~ 0.34, 0.24 ~ 0.28 とほぼ一定値である。5.3.1 に示したように $F_G' \gg F_T$ であるから，スリット式，ハイブリッド式に作用する波力は，吃水深，空隙率を考慮した合田式の波力に，ある定数を乗ずれば算定できる。なお，ハイブリッド式の場合，スリット板に作用する波力は，スリット式の約 0.7 倍になっている。これは，消波ブロックが存在するために岸側のスリット板に作用する波力が減少することによる。一方，立体トラス式の場合， $F_X' / (F_G' + F_T)$ は H/h の増加に伴い 0.18 より 0.36 へとわずかながら増加する。このことは，立体トラス式の場合，スリット式，ハイブリッド式に比べて波力に占める抗力の割合が大きいことを示す。しかしながら，実用上は $F_X' / (F_G' + F_T)$ を一定とみなすことができる。また，パイプ式の場合， $F_X' / (F_G' + F_T)$ は 1.06 ~ 1.19 とほぼ一定値である。

次に，沖波波高 H_0' を 12cm と固定し，周期を 1.6, 2.0, 2.8 s と変化させた場合の $F_X' / (F_G' + F_T)$ を図 5.6 に示す。ハイブリッド式の一例を除けば岸向きの波力の方が沖向きよりも大

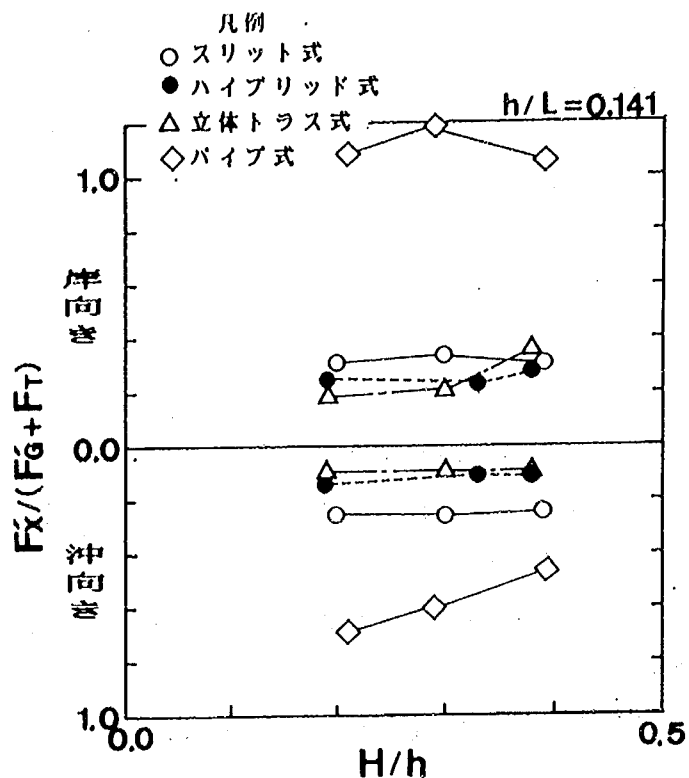


図 5.5 水平波力の測定値と算定値の関係 ($h/L = 0.141$)

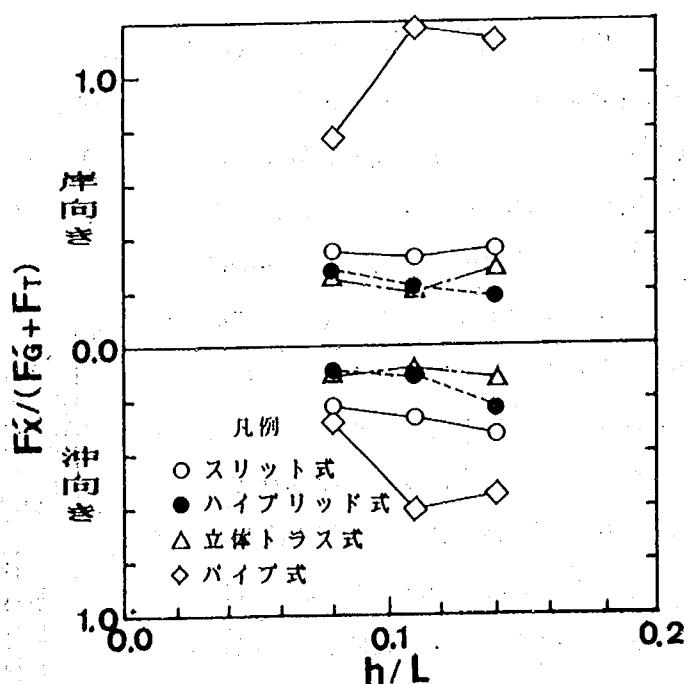


図 5.6 水平波力の測定値と算定値の関係 ($H_0' / h = 0.3$)

きいので、以下では岸向きの波力のみについて論ずる。スリット式の場合、 $F_{X'}/(F_{O'} + F_T)$ は 0.34 ~ 0.37 とほぼ一定の値である。一方、ハイブリッド式では、 $F_{X'}/(F_{O'} + F_T)$ は h/L の増加に伴い 0.33 より 0.16 とわずかながら減少する。これは波の周期が短いときには中詰ブロックによる乱れが大きく、岸側スリットに作用する波力の減少割合が大きいと考えられる。立体トラス式の場合、 $F_{X'}/(F_{O'} + F_T)$ は 0.21 ~ 0.29 とほぼ一定の値である。一方、パイプ式の場合、 $F_{X'}/(F_{O'} + F_M)$ の変動が他のタイプに比べて大きい。

5.4.3 鉛直波力の検討

三分力計で測定した鉛直合力は、波力と水位変動による浮力の変動分が合成された値である。また、パイプ式の場合パイプ内の残留水の重量も加わる。測定された鉛直合力は水位 η が静水面の時を基準としてある。厳密に波力のみを合力から分離するには浮力の変動と鉛直合力の位相差を考慮に入れなければならない。本実験においては各構造物で水位変動と鉛直合力の位相差は小さく、構造物前面に波の峰が到達したとき上向きの鉛直合力が最大となる。このことから、構造物前面に波の峰、谷が到達したときの平均水位を用いて水位変動に伴う力を計算することにした。平均水位 $\bar{\eta}$ は次式により求めた(図5.2参照)。

$$\bar{\eta} = \pm \frac{1}{2\pi \cdot B/L} \int_0^{2\pi \cdot B/L} a \cdot \cos \theta \cdot d\theta = \pm \frac{a}{2\pi \cdot B/L} \cdot \sin(2\pi \cdot B/L) \quad (5.10)$$

ここに、 B は構造物の幅、 L は構造物設置点の波長、 a は波の振幅であり、 $+$ 、 $-$ はそれぞれの波の峰、谷が構造物前面に到達した時の値を示す。この平均水位と 5.3.2 で求めた単位高さ当たりの水位変動に伴う力を用いて、合力から波力を分離した(表 5.4)。なお、パイプ式における残留水は、図 5.7 に模式的に示した範囲に存在すると考えた。すなわち、波の峰が構造物前面に到達したときと、波の谷が到達したときの平均水位 ($\bar{\eta}_{\max}$, $\bar{\eta}_{\min}$) との間に残留水が存在すると考え、残留水が鉛直下方の力として働くと考えた。表 5.4 によれば、スリット式、ハイブリッド式では鉛直波力よりも水位変動に伴う力 ($\Sigma F'$) の方が大きい。これに対し立体トラス式、パイプ式ではこの逆である。これは、スリット式、ハイブリッド式の場合、鉛直波力を受ける面積が立体トラス式、パイプ式に比べて小さいことによる。

次に、鉛直波力の算定方法について考え

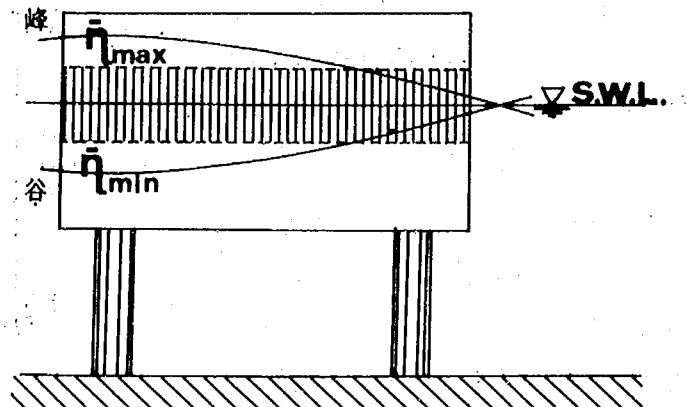


図 5.7 パイプ式構造物内の残留水による水面形の変化

表 5.4 鉛直波力と水位変動に伴う力

スリット式

	H_0' (cm)	T (s)	鉛直波力: F_z' (kg)		$\Sigma F'$ (kg)	
			上向き	下向き	上向き	下向き
1	12	1.6	—	0.22	1.49	1.49
2	8	2.0	0.19	0.17	1.30	1.30
3	12	2.0	0.06	0.79	1.94	1.94
4	16	2.0	—	0.91	2.59	2.59
5	12	2.8	0.57	0.19	2.33	2.33

ハイブリッド式

	H_0' (cm)	T (s)	鉛直波力: F_z' (kg)		$\Sigma F'$ (kg)	
			上向き	下向き	上向き	下向き
1	12	1.6	0.76	1.11	1.49	1.49
2	8	2.0	0.40	0.14	1.30	1.30
3	12	2.0	1.06	0.31	1.94	1.94
4	16	2.0	1.79	0.18	2.59	2.59
5	12	2.8	1.46	—	2.33	2.33

立体トラス式

	H_0' (cm)	T (s)	鉛直波力: F_z' (kg)		$\Sigma F'$ (kg)	
			上向き	下向き	上向き	下向き
1	12	1.6	2.14	2.04	0.56	0.56
2	8	2.0	1.23	1.14	0.39	0.39
3	12	2.0	2.61	2.23	0.59	0.59
4	16	2.0	4.68	4.13	0.79	0.79
5	12	2.8	3.76	2.11	0.62	0.62

パイプ式

	H_0' (cm)	T (s)	鉛直波力: F_z' (kg)		$\Sigma F'$ (kg)	
			上向き	下向き	上向き	下向き
1	12	1.6	4.77	17.38	3.35	9.96
2	8	2.0	5.42	7.21	2.91	8.66
3	12	2.0	7.25	12.79	4.36	13.00
4	16	2.0	7.57	17.44	5.82	17.32
5	12	2.8	6.96	2.38	5.22	15.54

ると、これについては現在のところ適当な算定式がない。このため、立体トラス式、パイプ式に使用する鉛直波力を、水面に設置された構造物と同じ幅をもつ1枚の水平板に作用する揚圧力 $F_{zu}^{2)}$ と比較した(図5.8)。この図は周期を2sと固定し、波高を8, 12, 16cmと変化させた場合を示す。立体トラス式の場合、 H/h の増加に伴い F_z'/F_{zu} は上向き、下向きとも大きくなる。これは、水平波力の場合と同じく波力にしろる抗力の割合が大きいためと考えられる。しかし、その大きさは水平板に作用する波力に比べてたかだか0.3倍程度と小さい。パイプ式では、上向きの波力は下向きの約0.4~0.7倍の大きさである。また、上向きの波力は H/h の増加に伴い $F_z'/F_{zu} = 0.32 \sim 0.22$ と減少するのに対し、下向きの波力は $F_z'/F_{zu} = 0.42 \sim 0.51$ と増大している。しかし、増加、減少の割合は小さい。パイプ式の場合も立体トラス式と同様に水平板に作用する鉛直波力に比べ小さい値である。これは各パイプ間を水が通過するためである。

次に波高を12cmに固定し周期を1.6, 2.0, 2.8sと変化させた場合の鉛直波力と揚圧力の関係を図5.9に示す。立体トラス式の場合、上向きの波力は h/L の増加に伴い $F_z'/F_{zu} = 0.28 \sim 0.18$ と

わずかに減少するが、下向きの波力はほぼ一定で $F_z'/F_{zu} = 0.10$ である。パイプ式の場合、上向きの波力は $F_z'/F_{zu} = 0.20 \sim 0.28$ でありほぼ一定している。しかし、下向きの波力は h/L の増加に伴い $F_z'/F_{zu} = 0.09 \sim 0.73$ へと急激に増大している。波の周期が長くなると水粒子の楕円軌道の長軸、すなわち水平方向の移動距離が大きくなり、パイプ内の残留水の量が少なくなる。このため、下向きの残留水重量を過大に見積もっていることが考えられる。

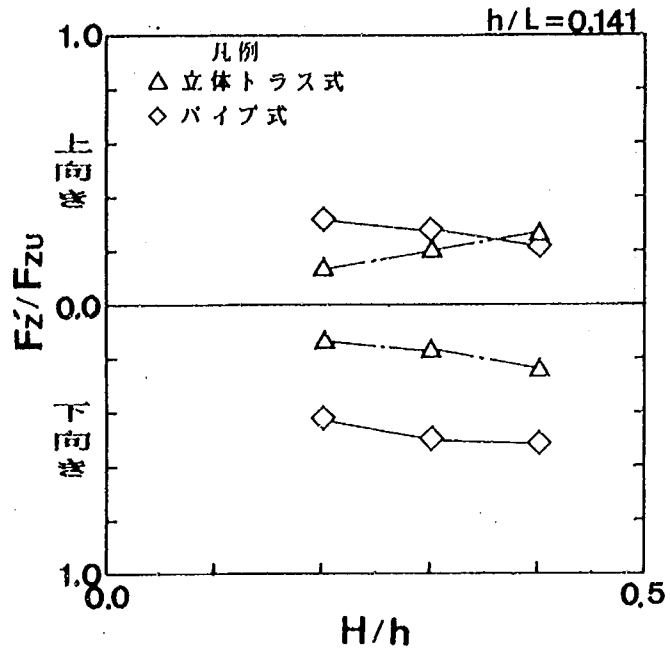


図5.8 鉛直波力の測定値と算定値の関係
($h/L = 0.141$)

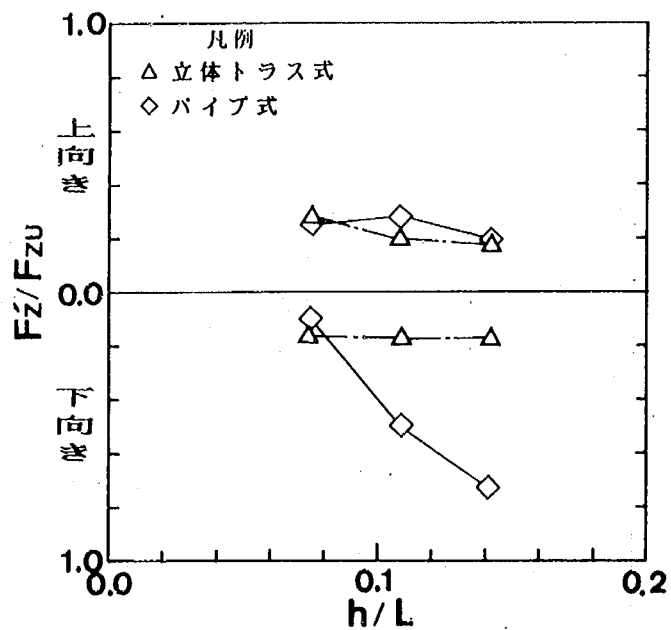


図5.9 鉛直波力の測定値と算定値の関係
($H_0'/h = 0.3$)

5.4 ま と め

今回の実験は限られた条件の下で行ったが、構造物に作用する波力の特性は以下のとおりである。

- ①スリット式に作用する水平波力は、合田式による算定値にある定数を乗じた値で表わされる。本実験における定数は0.3～0.4程度であった。
- ②ハイブリッド式の場合の水平波力は、自立した中詰ブロックを入れたために、スリット式に作用する水平波力の約0.7倍に低減した。
- ③立体トラス式の場合、スリット式、ハイブリッド式に比べて抗力による水平波力が支配的である。したがって、合田式を用いて水平波力を算定することは適切ではないが、実用上は合田式の約0.3倍の波力が作用すると考えてよい。
- ④パイプ式に作用する水平波力の大きさは、合田式の算定値と同程度であるが、波高、周期による変動が大きい。
- ⑤スリット式、ハイブリッド式の場合、鉛直波力はほとんど作用しない。
- ⑥立体トラス式の場合、鉛直波力は H/h の増加に伴い若干大きくなる。しかし、鉛直波力の大きさは水面に設置された水平板に作用する揚圧力のたかだか0.3倍である。
- ⑦パイプ式の場合、鉛直波力は上向きよりも下向きの方が大きい。パイプ内の残留水の重量が正確に把握できないため鉛直波力の大きさがばらつくが、他のタイプに比べると作用波力は大きいと考えられる。

謝 辞

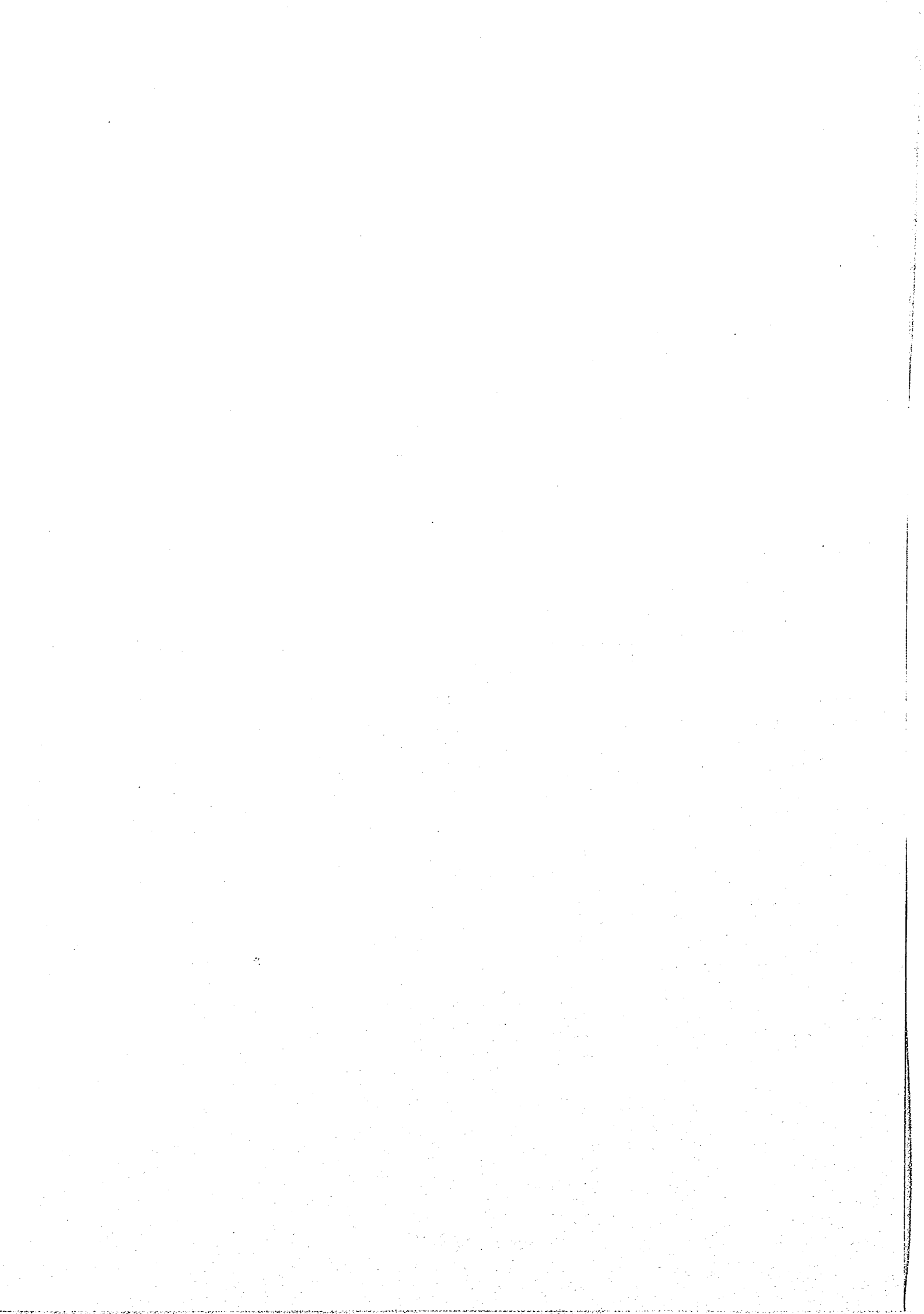
本実験を行うにあたりOES研究所小野泰三郎氏には立体トラス式模型、東洋水研側遠藤正男氏には中詰異形ブロック模型を提供していただいた。記してここに感謝の意を表します。

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，173p.，1987.
- 2)井島武士：海岸工学，朝倉書店，315p.，1970.

第 6 章 不規則波作用下での 海域制御構造物の消波効果

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
	部外研究員	藤原 隆一
	部外研究員	武中 信之



6.1 まえがき

土木研究所では、外洋に面した海域を静穏化するための構造物を開発することを目的として、民間各社との共同で海域制御構造物に関する研究を行ってきた。この研究により、海域制御構造物の規則波に対する消波効果は既に明らかになった^{1), 2)}。しかしながら、実際に海域制御構造物を設置する海域に來襲する波浪は、種々の波高、周期の波が重なりあった不規則波である。したがって構造物の消波効果の検討は、規則波の条件下のみでは不十分であり、不規則波の下での消波効果についても検討の必要がある。そこで本研究では、不規則波実験を行うことにより、海域制御構造物の消波特性を明らかにすることとし、代表的な構造物を選んで2次元水理実験を行った。構造物のタイプとしては、消波機能の異なるスリット式、透過水平板付スリット式および複合式の3種類¹⁾を選んだ。

6.2 実験方法

6.2.1 不規則波の発生

任意のスペクトルを持つ波形を発生させる方法としては、アナログおよびデジタル方式がある。本実験では、所定のスペクトルを持つ波形をデジタル方式で作成した^{3), 4)}。不規則波発生フローを図6.1に示す。なお、入射波は模型設置地点でBretschneider・光易型のスペクトル特性を有するように設定した。

6.2.2 模型設置地点の波の特性

最初に、模型を設置する地点の波の特性を調べた。水路は長さ142 m、幅0.6 m、深さ1.5 mの片面ガラス張りの2次元造波水路を用いた(図6.2)。水槽の一端には油圧式造波装置、反対側の端には消波装置が取り付けられている。本実験では、造波板より90 mの地点から勾配1/50の一様斜面として水路の底面を0.6 mかさ上げした。さらにこの地点から10 mは水平床とし、これより先は勾配1/10の一様斜面ですりつけた。実験の縮尺は1/25とし、フルードの相似則にしたがい模型の諸元を定めた。波浪条件は4通りとした(表6.1参照)。

水位変化は、模型設置地点に2台の容量式波高計を設置し

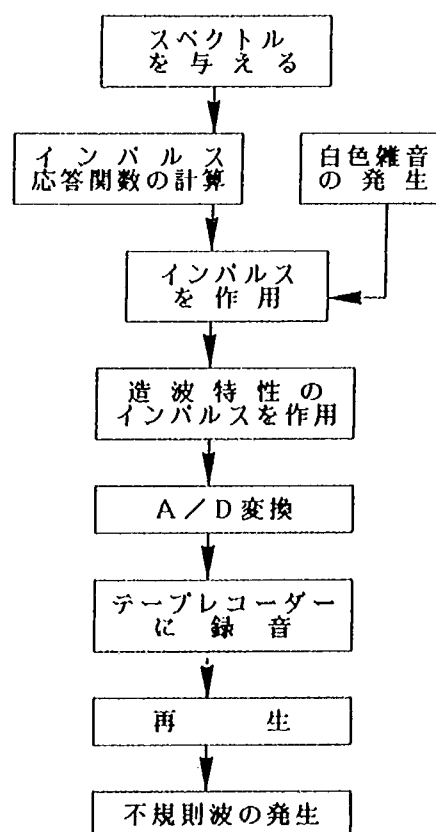


図6.1 不規則波発生フロー

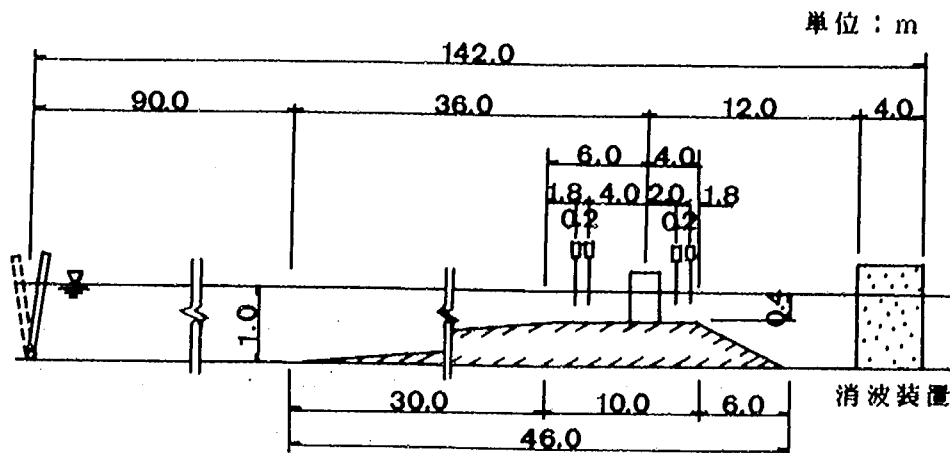


図 6.2 実験装置

て測定した。測定時刻は多重反射系での不規則波の安定性を検討するため、造波開始後 500, 800, 1000, 1400 s または 600, 1000, 1400 s とした。また、測定時間間隔は 0.05 s, 測定データ個数は 3000 個とした。次に合田ら⁵⁾の方法による入射波スペクトルの分離計算、およびゼロアップクロス法による解析を行った。合田らの方法による入射波スペクトルの計算における有効周波数の範囲は、波高計設置間隔を $\Delta\ell$ として次式で与えた。

$$\text{下限 } (f_{\min}) : \Delta\ell / L_{\max} = 0.03 \quad (6.1)$$

$$\text{上限 } (f_{\max}) : \Delta\ell / L_{\min} = 0.45 \quad (6.2)$$

ここに、 $L_{\max}$ および $L_{\min}$ は、有効周波数帯の下限周波数 $f_{\min}$ および上限周波数 $f_{\max}$ にそれぞれ対応する波長である。今回の実験での波高計設置間隔は 0.2 m であり、式 (6.1), (6.2) に対応する $f_{\min}$ および $f_{\max}$ は、それぞれ 0.30 Hz および 1.88 Hz であった。

反射率 K_R は、有効周波数帯の入射波エネルギー E_I および反射波エネルギー E_R を用いて次式で求めた。

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (6.3)$$

この反射率は波群全体としての平均的な値を表わす。入射波高 H_I および反射波高 H_R は、反射率 K_R とゼロアップクロス法によって計算した合成波の波高 H_s を用いて次式で求めた。

$$H_I = \frac{1}{\sqrt{1 + K_R^2}} H_s \quad (6.4)$$

$$H_R = \frac{K_R}{\sqrt{1 + K_R^2}} H_s \quad (6.5)$$

ここに、 H_s としては模型設置地点およびその沖側 0.2 m 地点の有義波高の平均値を用いた。

多重反射系における不規則波に関する問題は谷本ら⁶⁾が取り扱っている。その結果によると、不規則波が多重反射系の中で安定するまでの時間は、①模型設置前の波の場合、有義波の群速度で波群が消波装置へ到達するに要する時間の約 2 倍、②構造物の反射率が 0.6 以下の場合、有義波の群速度で波群が模型へ到達するに要する時間の約 6 倍である。今回の実験条件では、模型設置を行わない場合 $t = 160 \sim 280$ s、構造物設置時の場合 $t = 430 \sim 950$ s である。模型設置地点の波の諸元および消波装置の反射率の時間的な変化を表 6.2 に示す。なお、表中の r は有義波高の変化率で次式で表わされる。

$$r = \frac{(H_{t_2})_{1/3} - (H_{t_1})_{1/3}}{(H_{t_1})_{1/3}} \times 100 (\%) \quad (6.6)$$

ここに、添字 t_1 は任意の測定時刻、 t_2 はそのすぐ後の測定時刻を表わしている。変化率 r は、各測定時刻の間で $r = -7.3 \sim 11.4$ % であり、変化率は小さい。また、反射率 K_R については $K_R = 0.07 \sim 0.16$ であり、消波装置の反射波の影響は少ない。

次に、各ケースの入射波スペクトルを示す (図 6.3 ~ 6.6)。図中の破線は、実験で得られた有義波の諸元を持つ Bretschneider・光易型スペクトルを表わす。これらは入射波スペクトルが設定スペクトルに最も近かった $t = 1000$ s の場合の結果である。ケース 1 および 3 の場合に、周波数 $f = 1.2$ Hz 以上の高周波領域で Bretschneider・光易型スペクトルよりもスペクトル密度の減少割合が大きいことを除くと、各ケースとも目標スペクトルの形状に比較的良く一致している。

表 6.2 通過波の諸元および反射率

		Hmean (cm)	Tmean (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/10}$ (cm)	$T_{1/10}$ (s)	Hmax (cm)	Tmax (s)	r (%)	K_R
ケース 1 $H_{1/3} = 4$ cm $T_{1/3} = 1.2$ s	500	2.32	1.13	3.55	1.27	4.48	1.25	5.60	1.22	4.8	0.07
	800	2.56	1.15	3.72	1.24	4.38	1.25	4.80	1.24	10.5	0.11
	1000	2.73	1.14	4.11	1.26	4.92	1.24	5.40	1.30	9.7	0.08
	1400	2.94	1.16	4.51	1.23	5.54	1.23	6.48	1.25	—	0.09
ケース 2 $H_{1/3} = 4$ cm $T_{1/3} = 1.6$ s	600	3.63	1.21	5.36	1.46	6.55	1.58	7.90	1.71	11.4	0.15
	1000	4.10	1.22	5.97	1.48	6.78	1.45	8.11	1.35	6.2	0.12
	1400	4.32	1.21	6.34	1.41	7.48	1.38	9.51	1.25	—	0.16
ケース 3 $H_{1/3} = 8$ cm $T_{1/3} = 1.6$ s	600	4.83	1.34	7.59	1.49	9.65	1.59	11.80	1.77	6.2	0.10
	1000	5.47	1.38	8.11	1.54	9.78	1.50	11.38	1.47	6.2	0.10
	1400	5.68	1.43	8.61	1.49	11.09	1.41	12.83	1.42	—	0.12
ケース 4 $H_{1/3} = 8$ cm $T_{1/3} = 2.0$ s	600	5.23	1.66	8.07	1.92	10.15	1.98	12.41	1.71	-7.3	0.09
	1000	4.72	1.56	7.48	2.02	9.01	2.16	11.76	2.14	7.4	0.10
	1400	5.27	1.57	8.03	1.87	9.46	1.81	10.55	1.94	—	0.09

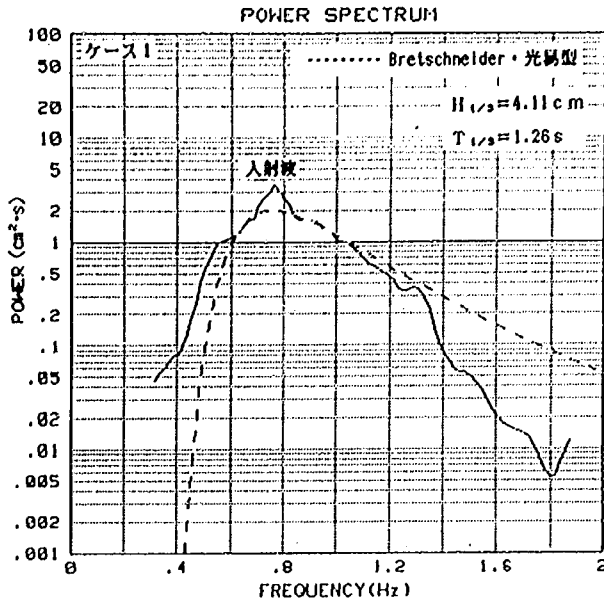


図 6.3 入・反射波スペクトル (ケース 1)

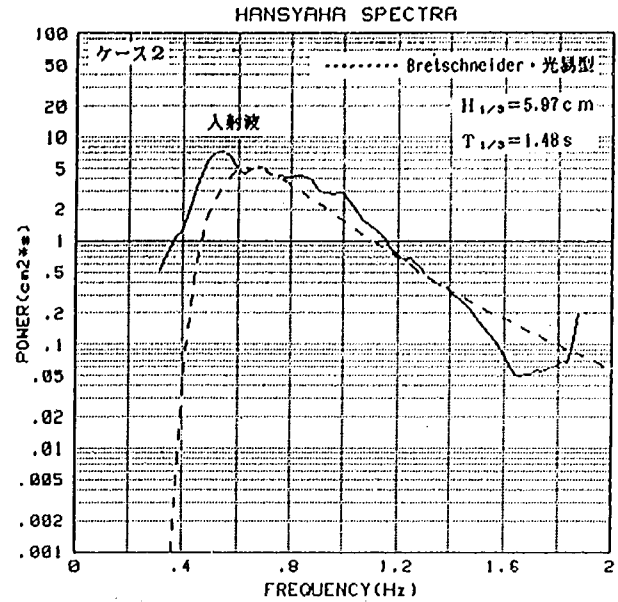


図 6.4 入・反射波スペクトル (ケース 2)

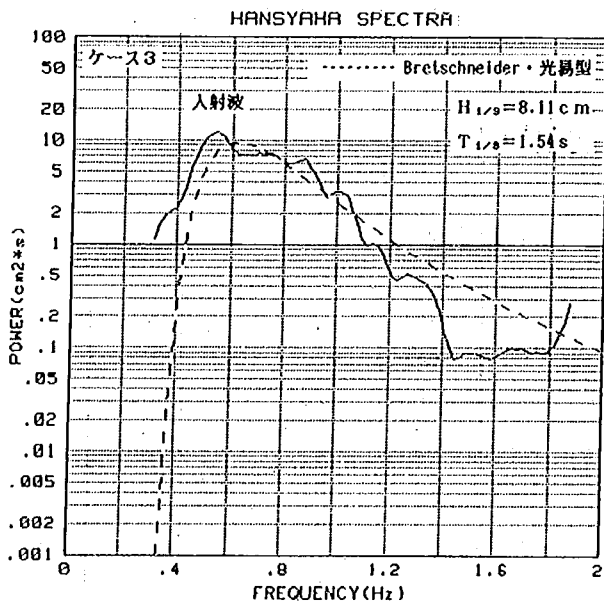


図 6.5 入・反射波スペクトル (ケース 3)

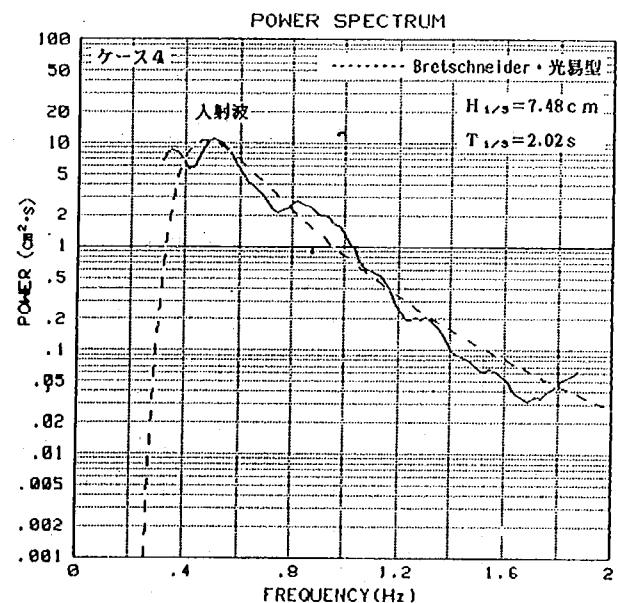


図 6.6 入・反射波スペクトル (ケース 4)

同様に、実験波の波高頻度相対分布を示すと、図 6.7～6.10 となる。これらについても入射波スペクトルが最も安定した $t = 1000s$ の場合の結果を示す。ケース 2 の $H/H_{mean} = 1.2 \sim 1.4$ の頻度が理論値よりも大きいことを除くと、波高頻度分布は Rayleigh 分布と良く一致している。

一方、前出の表 6.2 を改めて参照すると、ケース 2 の場合、設定波高よりも有義波の測定値の方がかなり大きくなっている。この原因は、ケース 1、4 および模型を設置した実験と異なり、ケース 2 および 3 においては水路壁の藻を除去したことによる。しかし、藻の摩擦減衰による入射波スペクトルの大きな変化はなかった。(図 6.4, 6.5 参照)

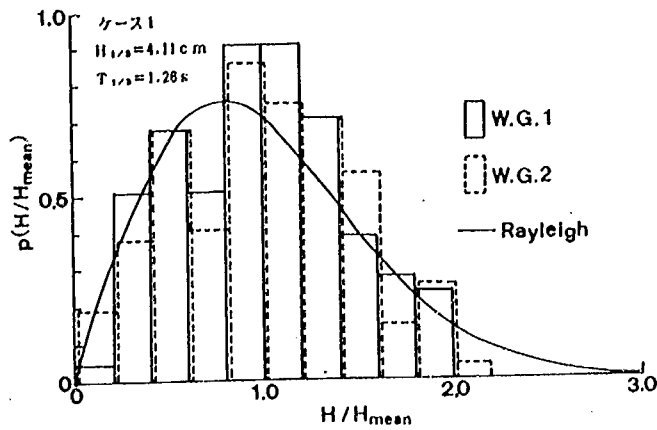


図 6.7 波高頻度分布 (ケース 1)

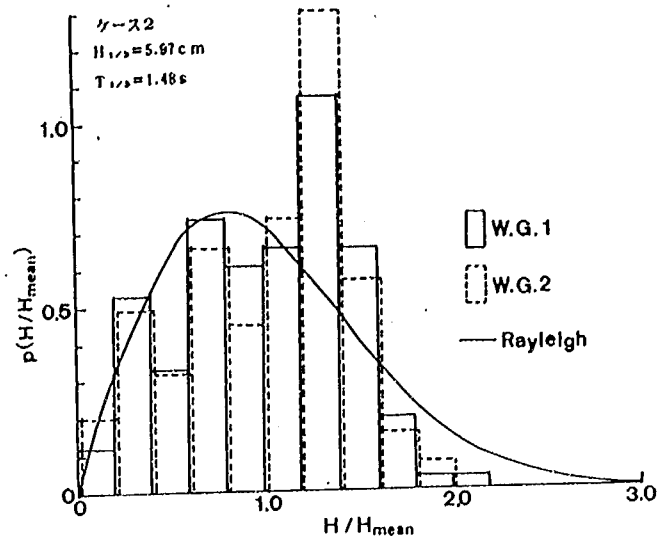


図 6.8 波高頻度分布 (ケース 2)

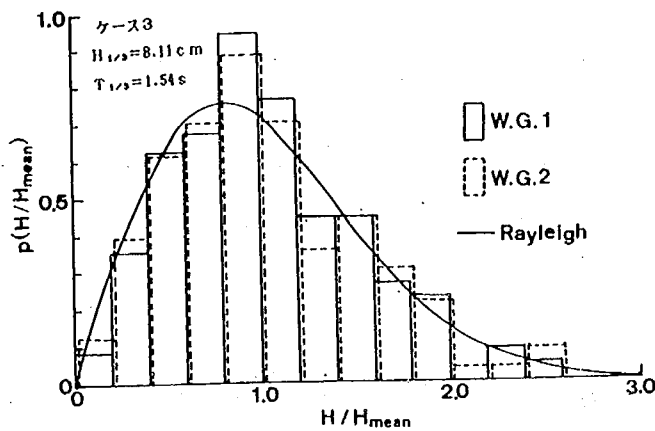


図 6.9 波高頻度分布 (ケース 3)

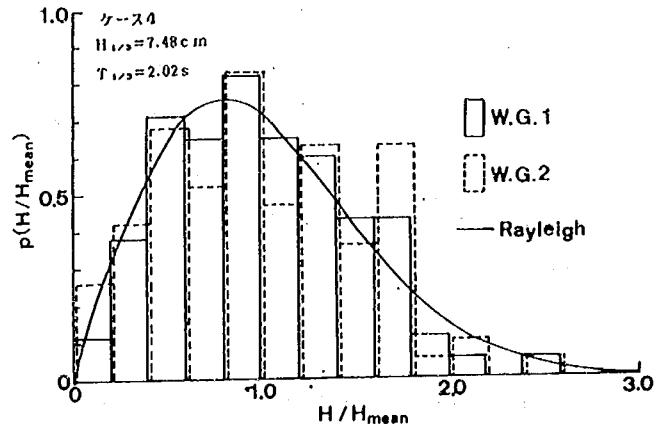


図 6.10 波高頻度分布 (ケース 4)

6.2.3 模型を設定した実験の解析方法

模型設置時における波の測定方法は、模型を設置しない場合とほぼ同様である。模型設置地点より沖側 4 m, 岸側 2 m の位置に各 2 台の容量式波高計を 0.2 m 間隔で設置し、水位を測定した (図 6.2)。測定開始時刻は、模型設置地点のスペクトルが設定スペクトルに最も近い値を示した。t = 1000 s とした。また、測定時間間隔は 0.05 s, 測定データ個数は 4100 個とした。反射率および入, 反射波高は模型を設置しない場合と同様にして求めた。透過波については、消波装置の反射率が 0.07 ~ 0.16 と十分低かったため、入, 反射波の分離推定は行わなかった。透過率 K_T は、次に示す 2 種類の式で定義される。

$$K_{T1} = \frac{(H_T)_{1/3}}{(H_I)_{1/3}} \quad (6.7)$$

$$K_{T2} = \sqrt{\frac{E_T}{E_I}} \quad (6.8)$$

ここに、 $(H_I)_{1/3}$ および $(H_T)_{1/3}$ は、それぞれ入射および透過波の有義波高であり、 E_I および E_T は有効周波数帯の入射および透過波のエネルギーである。なお $(H_T)_{1/3}$ は、2点の平均値である。今回解析した結果では、 K_{T1} と K_{T2} の値はほぼ等しかった。このため、透過率 K_T は、反射率の定義と同様にエネルギー比の平方根 K_{T2} を用いた。

次に、各成分波ごとの見掛けの透過率 K_T' および反射率 K_R' を次式で求めた。

$$K_T'(f) = \sqrt{\frac{S_T(f)}{S_I(f)}} \quad (6.9)$$

$$K_R'(f) = \sqrt{\frac{S_R(f)}{S_I(f)}} \quad (6.10)$$

ここに、 $S_I(f)$ 、 $S_T(f)$ および $S_R(f)$ は、各成分波ごとの入射、透過および反射波のスペクトル密度である。 K_T' 、 K_R' は、その構造が種々の成分波からなる不規則波に対する透過、反射特性を表わす。

実験に用いた模型の諸元を表 6.3 に示す。複合消波構造物の実験では、規則波実験と模型諸元を一致させるため、水深 0.4 m の水平床部 10 m 間を水路幅が 0.533 m となるように合板で区切り模型を設置した (図 6.11)。なお、合板の端部は滑らかに水路壁にすりつけた。この場合、水路幅を模型を置かない場合の 89% と狭くしても、模型設置地点におけるスペクトル形には著しい変化は生じないと考え、波の検定は行わなかった。

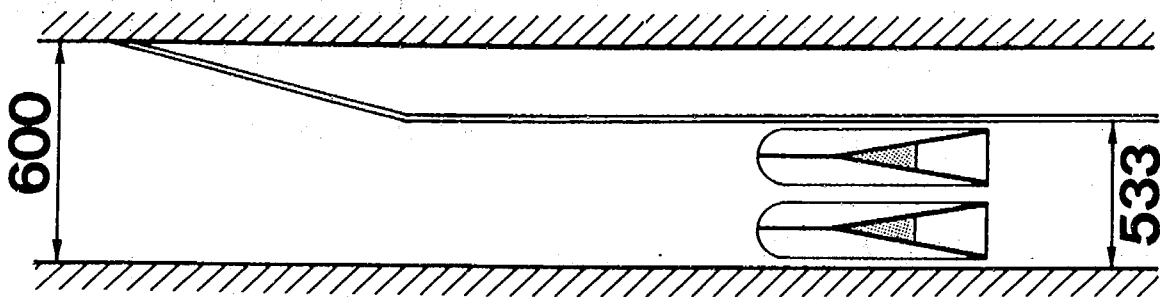
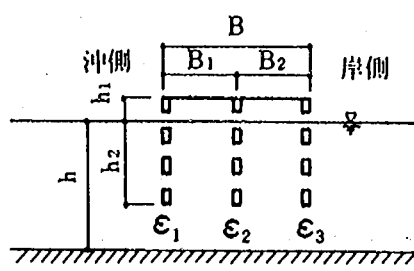
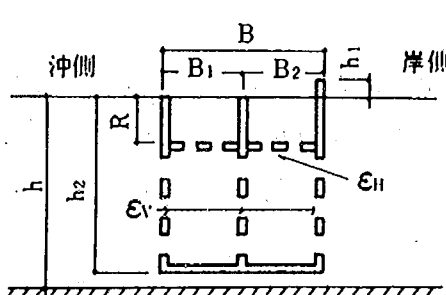
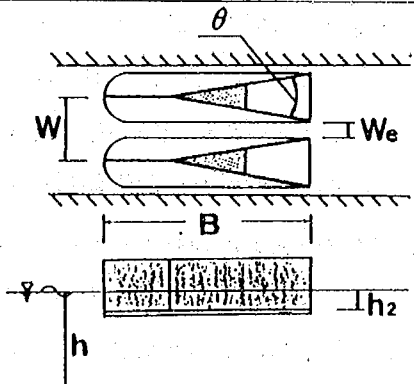


図 6.11 複合消波構造物の模型設置方法

表 6.3 模 型 の 諸 元

構 造	構 造 条 件	実 験 模 型 諸 量	記 号
スリット式 構 造 物	スリット枚数 $N = 3$ $\epsilon_1 = 0.3$ $\epsilon_2 = 0.2$ $\epsilon_3 = 0.1$	$h = 40 \text{ cm}$ $h_2/h = 0.85$ $B/h = 1.5$ $B_1/B_2 = 1.0$ $h_1/h = 0.5$	
透過水平板付 スリット式 構 造 物	スリット枚数 $N = 3$ $\epsilon_V = 0.26$ $\epsilon_H = 0.18$	$h = 40 \text{ cm}$ $h_2/h = 1.0$ $B/h = 1.25$ $B_1/B_2 = 1.0$ $h_2/h = 0$ $R/h = 0.1$	
複 合 消 波 構 造 物	2 体 模 型 開閉角 $\theta = 21^\circ$	$h = 40 \text{ cm}$ $h_2/h = 0.2$ $B/h = 2.0$ $W = 26.7 \text{ cm}$ 開口率 $W_e/W = 25 \%$	

6.3 実験結果と考察

6.3.1 スリット式構造物

透過率 K_T , 反射率 K_R は有義波の諸元により整理し, 規則波による実験結果¹⁾と比較する。以下, 文中の相対幅 $B/L_{1/3}$ については 有義波諸元を示す添字 $1/3$ を省略する。

B/L と K_T , K_R の関係を図 6.12 に示す。 K_T は規則波の場合と同様に, B/L が大きくなると緩

やかに減少する。 K_R は、 B/L が大きくなるにしたがい減少する傾向は同じであるが、規則波の場合に比べ $B/L \geq 0.25$ で差が広がり、 $B/L = 0.3$ で 0.1 程度大きな値となる。この理由は次のように考えられる。この模型は、3枚のスリット板から構成されており、中間および岸側スリット板から発生した反射波は、冲向きに伝播する。この場合、スリット板を通過する反射波は、高周波数の波ほど減衰しやすい（図 6.12 参照）。また、不規則波の場合、有義波相当の周波数をもつ波より低周波数の波も含まれる。したがって、有義波周期が短い場合、

低周波数の波がスリット板を通過するときに減衰しにくい特性を有するが故に、不規則波の K_R は規則波の場合より大きくなる。逆に有義波周期が長い場合、低周波数の波の K_R に対する影響は小さく、不規則波と規則波における K_R の差は小さくなる。

得られた K_T 、 K_R からエネルギー損失率 K_L^2 を計算し、相対幅 B/L との関係を図 6.13 に示す。 $0.17 \leq B/L \leq 0.31$ に対して、 $K_L^2 = 0.6 \sim 0.8$ の値をとり、規則波による値と良く一致する。

次に、スペクトルを用いて消波特性、機能の分析を行った。代表として $H_{1/3} = 1.22\text{s}$ の場合の入射、反射のスペクトル密度を図 6.14 に示す。ここに、入射、反射波スペクトルは有効周波数域での結果を示しており、平滑化操作のため両端部付近では発散点の影響が多少表われている。透過波スペクトルは入射波スペクトルのエネルギーレベルを全体的に下げた形状である。 $0.4\text{ Hz} \leq f \leq 1.4\text{ Hz}$ において、 f が大きくなるにしたがい入射波と透過波のエネルギーレベルの差は広がり、高周波数になるほど成分波のエネルギーが減衰し易いことがわかる。これに対し反射スペクトルの形状は大きく変化している。特に周波数 $f = 0.75$ 、

1.20 Hz ではスペクトル密度は大きく減衰している。これは $B/L = 0.25, 0.5$ の場合を示しており、3枚スリット相互の反射波の重合効果によるものである^{1),7)}。また、反射波の高周波成分のエネルギー

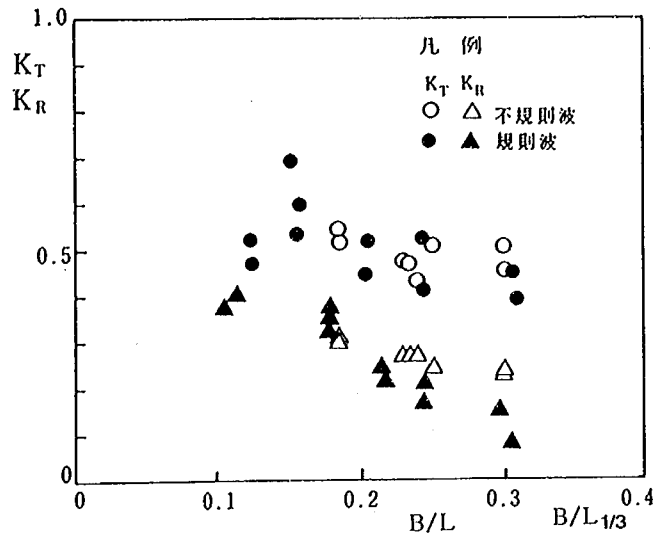


図 6.12 スリット式模型の K_T 、 K_R と B/L の関係

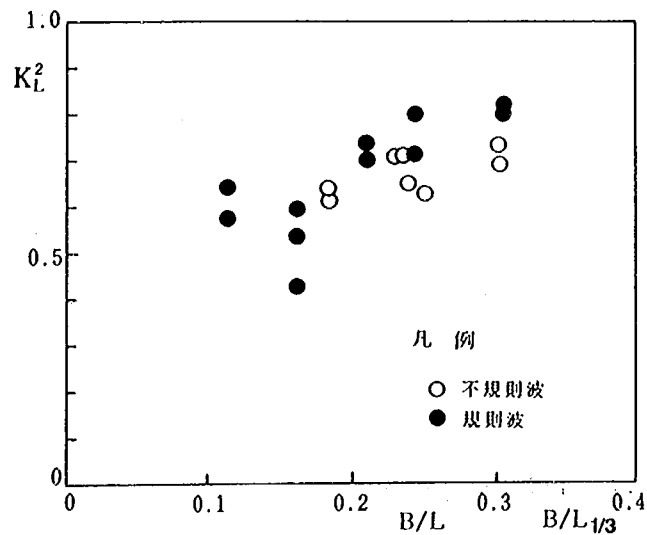


図 6.13 スリット式模型の K_L^2 と H/L の関係

レベルは入射，透過波のそれらと比較して高く，波の分裂により低周波側から高周波側へのエネルギーの移行が起きていることを示している。

見掛けの透過率 K_T' ，反射率 K_R' を図 6.15 に示す。図 6.14 の場合と同様，表示した周波数域の両端部付近は発散点の影響を受けているので，推定精度は低い。 K_T' は高周波数になるにしたがい徐々に減少し， $f = 1.4 \text{ Hz}$ で極小値となり，その後増加する。スリット式構造物では低周波

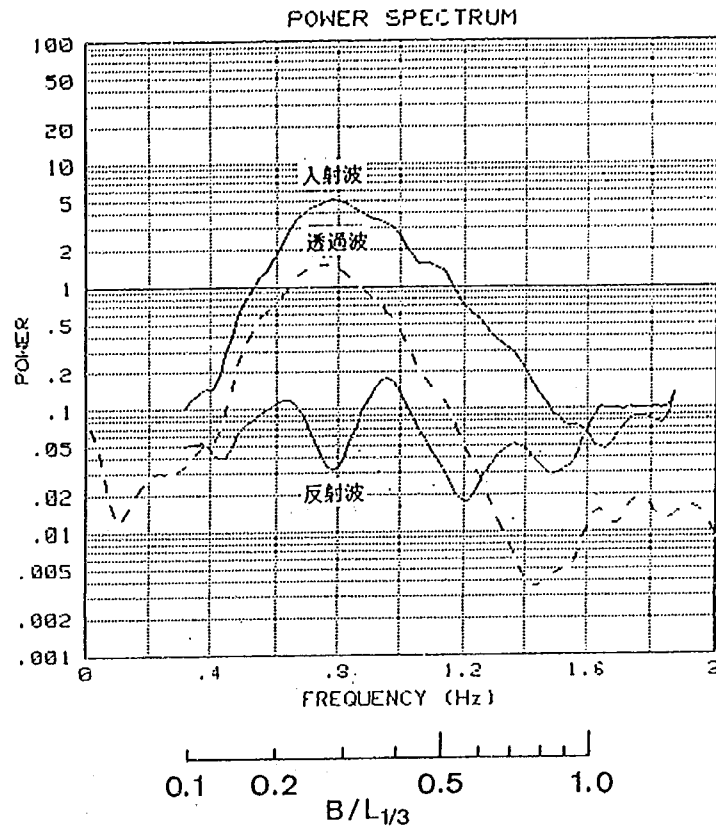


図 6.14 スリット式模型のスペクトル形の変化

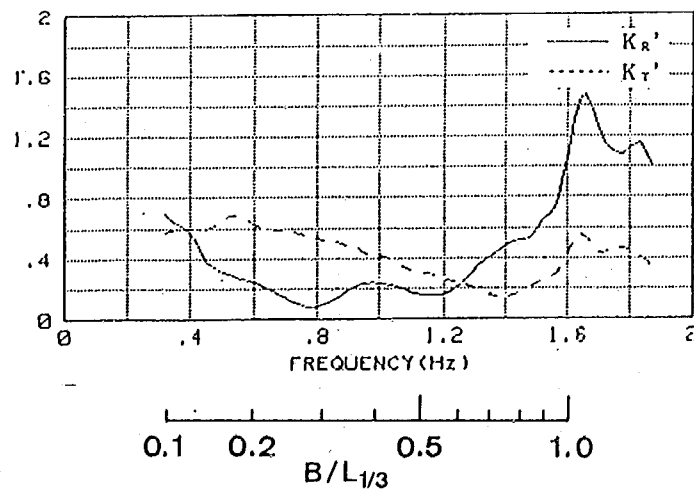


図 6.15 スリット式模型の K_T' ， K_R'

成分が減衰しにくく、透過し易いという従来の考えを裏付ける結果となっている。また、高周波数域での K_T' の増加は、波の分裂によるエネルギー移行の結果である。 K_R' は反射波の重合効果によって二つの極小値を持ち、それより低周波側および高周波側においてエネルギーレベルが増加している。特に高周波側では増加が著しい。これは低周波成分が減衰しにくい点と、高周波成分へのエネルギー移行に起因するものである。

6.3.2 透過水平板付スリット式構造物

透過率 K_T 、反射率 K_R と相対幅 B/L の関係を図 6.16 に示す。 K_T は規則波の場合と同様に、 B/L が大きくなるにつれて減少する。ただし、規則波で見られた $B/L \geq 0.2$ での急激な減少と異なり、緩やかな減少傾向を持つ。 K_T の値は $0.3 \sim 0.5$ であり、 $B/L \leq 0.2$ では規則波より 0.1 程度小さく、 $B/L \geq 0.2$ では同程度の値となる。不規則波は種々の周波数の波より成っているため、規則波の場合のように急激な変化が起こりにくいことがわかる。 K_R は規則波の場合と同じなだらかな増加傾向を示し、 $0.14 \leq B/L \leq 0.25$ で $K_R = 0.25 \sim 0.35$ と、両者は、ほぼ一致する傾向を示す。

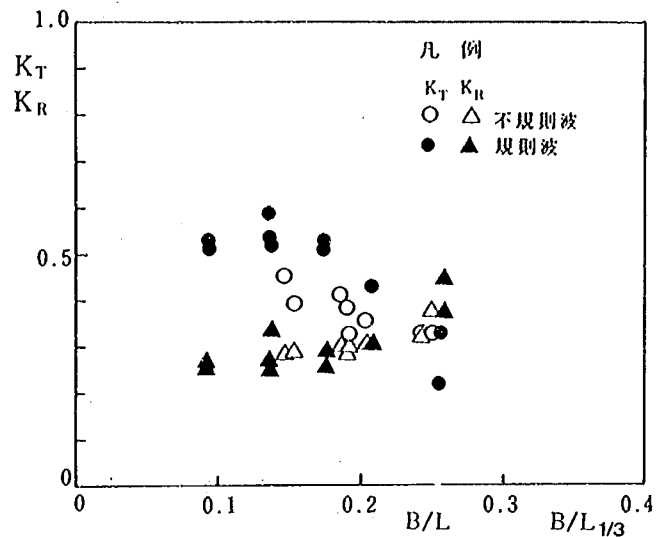


図 6.16 透過水平板付スリット型の K_T 、 K_R と B/L の関係

次に、エネルギー損失率 K_L^2 と相対幅 B/L の関係を図 6.17 に示す。 B/L が大きくなると K_L^2 は増加する。また、 $B/L = 0.14$ では規則波の値より 0.1 程度大きな値を示すが、徐々に差がなくなり、 $B/L = 0.25$ ではほぼ一致する。

スペクトル形の変化について $H_{1/3} = 6.10 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.23 \text{ s}$ の場合を例として示す。まず透過波スペクトルと入射波スペクトルとの比較を行った (図 6.18)。高周波数帯を除き、透過波スペクトルのスペクトル密度は入射波のエネルギーレベルを全体的に下げたものとなっている。

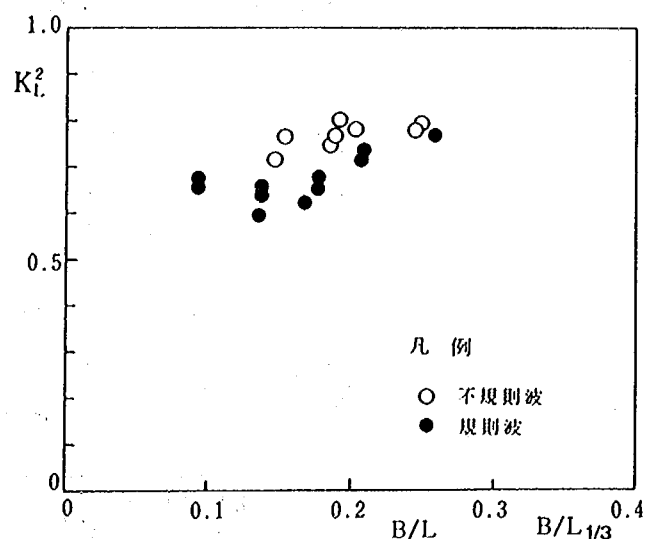


図 6.17 透過水平板付スリット型の K_L^2 と B/L の関係

ただし、水平板上で起こる砕波等の影響により高周波成分へのエネルギーの移行が起こっているため、高周波数域では比較的大きなエネルギーレベルを示している。反射波スペクトルについても有効周波数全域にわたりエネルギーレベルが低下した。この構造体はスリット式構造物に透過水平板を追加したものである。しかし、スリット式構造物で見られる反射波の重合効果は見られない。よって、スリットからの反射波の重合効果よりも透過水平板による反射の方が大きいことがわかる。

見掛けの透過率 K_T' 、反射率 K_R' を図 6.19 に示す。 K_T' は高周波になるにつれて減少し、 $f = 1.1 \text{ Hz}$ で極小値をとった後、高周波数域にお

いて増加している。高周波数域での K_T' の増加の原因は、水平板上で起こる砕波および水平板スリットからの鉛直噴流に伴う乱れによって高周波成分へのエネルギーの移行がおこったためである。 K_R' は周波数が高くなるにしたがい、徐々に増加する。スリット式構造物の場合見られた反射波の重合効果によるスペクトル密度の低下がないのは、水平板からの反射波がスリット板からの反射波よりも強いからである。

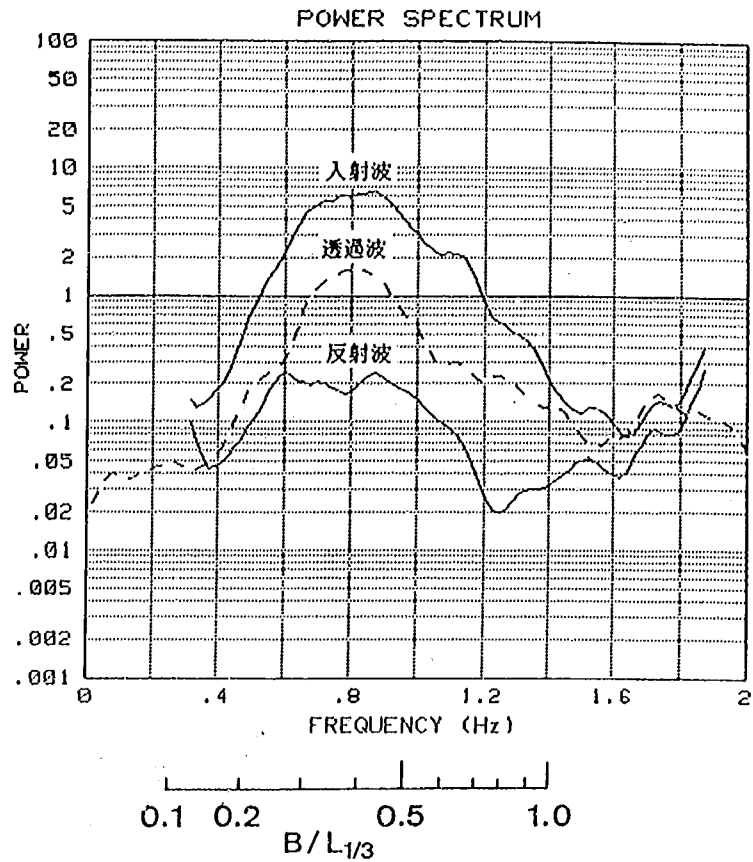


図 6.18 透過水平板付スリット型模型のスペクトル形の変化

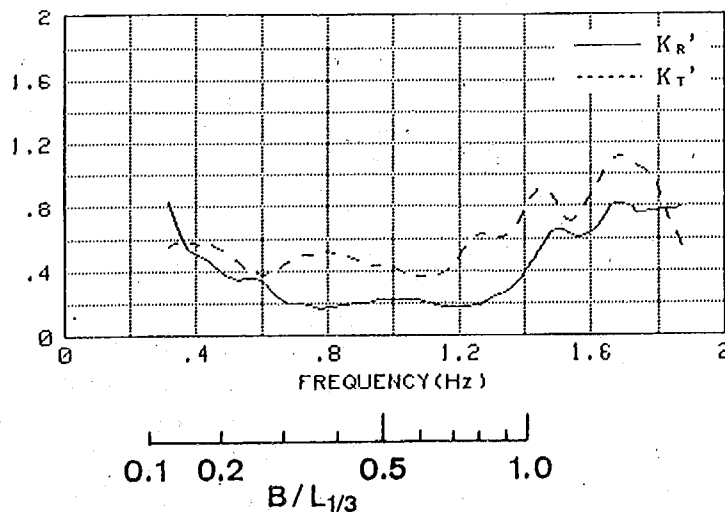


図 6.19 透過水平板付スリット型模型の K_T' 、 K_R'

6.3.3 複合消波構造物

相対幅 B/L と K_T , K_R の関係を図 6.20 に示す。規則波の場合, B/L が増加するにしたがい K_T は減少するが, $0.33 \leq B/L \leq 0.41$ では波高によるばらつきも大きい。不規則波の場合, 有義波高値は 5.88 cm から 11.1 cm と大きく変化しているにもかかわらず, K_T の変化はあまり見られず, B/L が大きくなると K_T は単調に減少する。不規則波作用下では, 有義波高による差異は現われにくくなることがわかる。

K_R については規則波の場合と同じ傾向を持つ。しかしながら今回用いた模型は前回と異なり, 下部にピア基礎構造物を持つためその反射も加わり, K_R は 0.1 程度増加している。

B/L とエネルギー損失率 K_L^2 の関係は図 6.21 のようである。不規則波による K_L^2 の値は B/L が大き

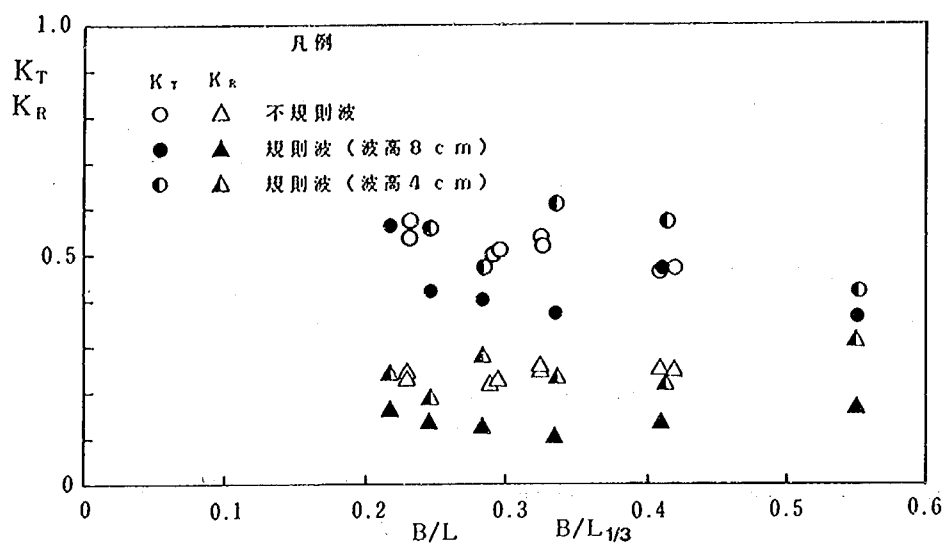


図 6.20 複合消波構造物の K_T , K_R と B/L の関係

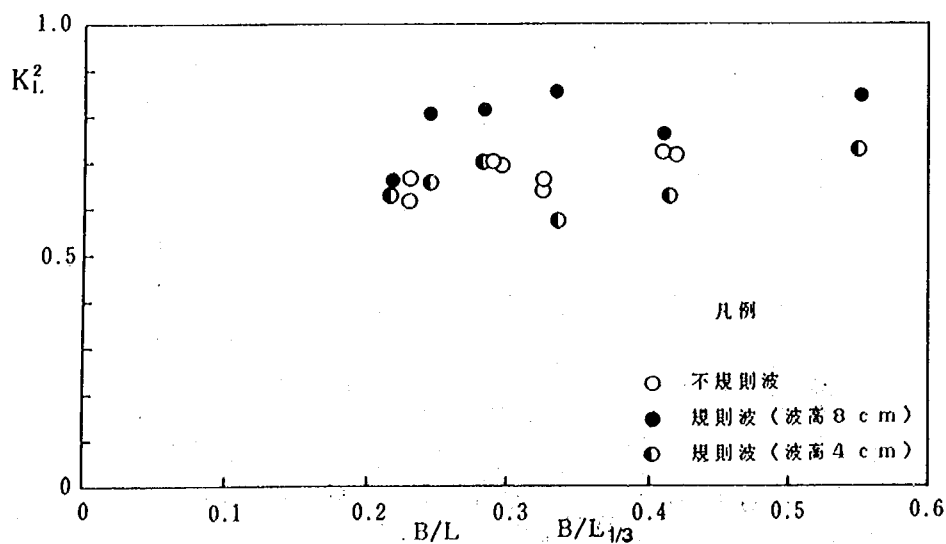


図 6.21 複合消波構造物の K_L^2 と B/L の関係

くなるにしたがい直線的に増加し、規則波にみられたように波高値に依存したばらつきはなくなる。

K_R がほとんど変化しないため K_T による特性がそのまま出ている。

次に、スペクトル形の変化を $H_{1/3} = 6.45 \text{ cm}$, $T_{1/3} = 1.19 \text{ s}$ の場合を例として 図 6.22 に示す。透過波のエネルギーレベルは、高周波成分において増加があるものの入射波スペクトルのレベルを全体に下げた形となっている。高周波数域でのエネルギーレベルの増加は、位相差による乱れと水平板上の砕波等の影響によりエネルギーの移行が生じたためである。反射波スペクトルにおいても、入射波と比較し高周波数域でのエネルギーレベルの増加傾向が見られる。

見掛けの透過率 K_T' , K_R' を図 6.23 に示す。 K_T' は $f \leq 1.2 \text{ Hz}$ では値に大きな変化はない。 $f = 1.2 \text{ Hz}$ では K_T' は増加し、入射波のエネルギーの一部が高周波数域へ移行したことを示している。 K_R' も $f \geq 1.2 \text{ Hz}$ において増加しており、乱れ、砕波等によるエネルギーの移行が透過側ばかりでなく反射側にも表われる。

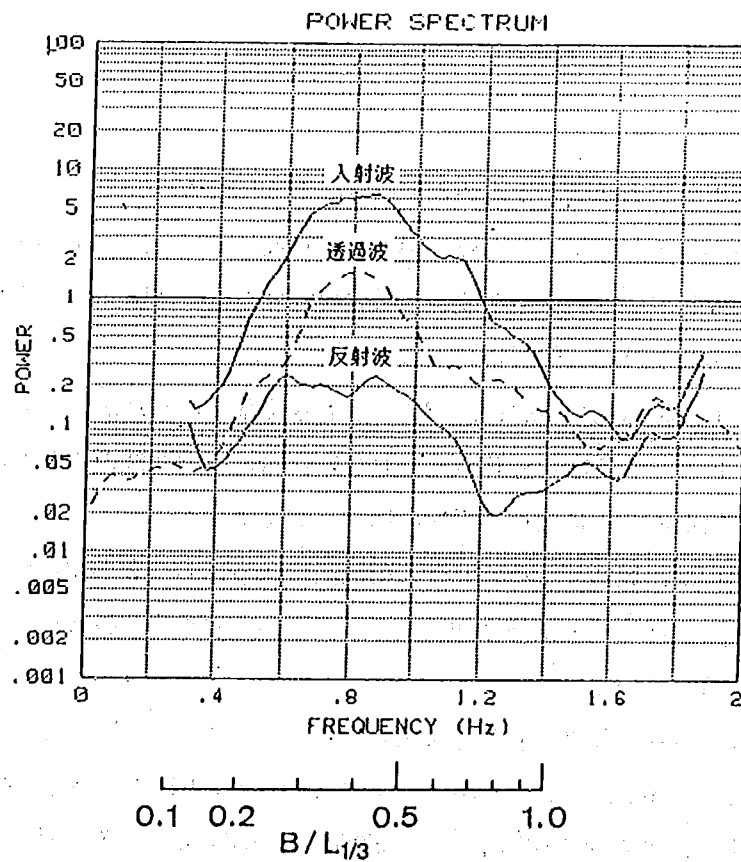


図 6.22 複合消波構造物のスペクトル形の変化

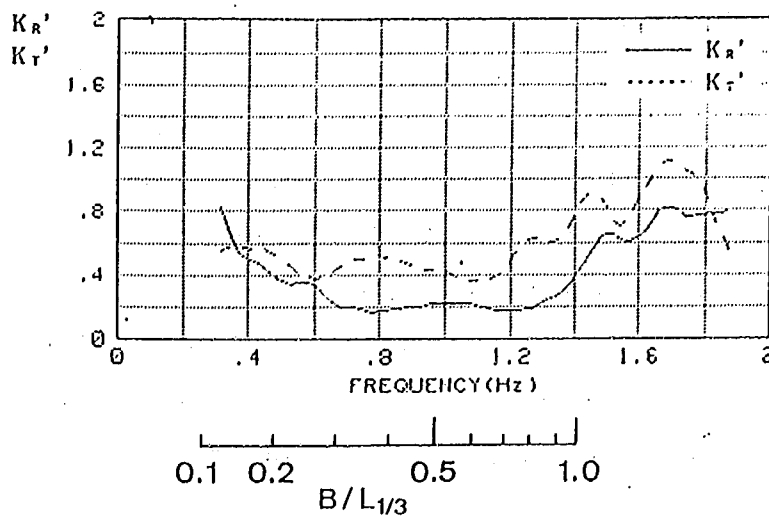


図 6.23 複合消波構造物の K_T' , K_R'

6.4 まとめ

各構造物の不規則波作用下での特徴をまとめると以下ようになる。

- ① スリット式構造物の K_R は、規則波と比較し $B/L \geq 0.25$ で若干大きくなるものの、 K_T とともにほぼ規則波の場合と一致している。不規則波の各周波数成分ごとの透過・反射特性は、規則波を構造物に作用させたとき得られる透過・反射特性とほぼ一致した。
- ② 透過水平板付スリット式構造物の K_T は、 B/L が大きくなるにしたがい緩やかに減少し、規則波作用下の $B/L \leq 0.2$ における急激な変化は見られない。 K_R は規則波の場合とほぼ一致している。この構造物は、透過、反射波ともに透過水平板の影響を強く受ける。
- ③ 複合消波構造物の K_T は、規則波でみられた入射波高によるばらつきが平滑化されて表われる。また、規則波実験の場合と異なり、下部構造物としてピアがあるため K_R が 0.1 程度大きくなっているが、傾向は規則波と一致している。

以上より構造物の消波特性を不規則波作用下で考える場合、次のことが言える。

- ① 不規則波実験で得られた K_T , K_R の傾向は、規則波の場合と同一であり、有義波の諸元を規則波と対応させることにより、不規則波作用下での消波効果を予測することが可能である。
- ② 各周波数成分ごとにみた消波特性は、その周波数を持った規則波作用下での消波特性と合致し、不規則波の消波特性は規則波の消波特性を重ね合せたものとなっている。

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，173p.，1987.
- 2) 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 (2)，土木研究所資料，第 2510 号，138p.，1987.
- 3) 富永正照・橋本 宏：造波機による不規則波の発生，第17回海岸工学講演会論文集，pp.415～419.，1970.
- 4) 橋本 宏：数値計算による不規則波の発生，土木技術資料，Vol.12，No.9，pp.32～35.，1970.
- 5) 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.
- 6) 谷本勝利・富田英治・村永 努：水路における不規則波の再反射波の影響について，港湾技研資料，No.467，23p.，1983.
- 7) 菅原輝男・長野 章・小林悦郎：直立透過堤の反射率と透過率について，第22回海岸工学講演会論文集，pp.551～555.，1975.

第7章 乱れと反射を利用した海域制御構造物の波力に関する水理模型実験 (第1報)

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

〃 山 本 幸 次

共同研究第1グループ

飛島建設(株)総合企画本部技術開発部 岡 幸 夫

〃 松 尾 和 男

五洋建設(株)技術本部技術研究所 国 栖 広 志

〃 福 山 博 信

三井建設(株)土木本部土木技術部 高 木 春 生

〃 吉 川 雅 人

清水建設(株)技術研究所海洋グループ 萩 原 運 弘

〃 大 山 巧

大成建設(株)土木本部設計部 渡 邊 朗

〃 小 山 文 男

7.1 まえがき

乱れと反射を利用した各種消波構造物の消波特性に関しては、すでに実験結果を報告している¹⁾。これらの消波構造物を実用化するためには消波特性のほかに波力特性を明らかにし、その安定性を検討する必要がある。乱れと反射を利用した消波構造物はスリット構造、水平板構造、あるいはそれらを組み合わせた透過性構造物である。透過性構造物の場合、不透過性構造物に比べて堤体に作用する波力は小さいと考えられるが、どの程度小さいかについては水理実験等により検討を行う必要がある。

本研究では、乱れと反射を利用した各種消波構造物に対して水理模型実験を行い、それぞれのタイプの構造物に作用する波力の特性を明らかにした。ただし、ここでは水路の造波特性より重複波領域についてのみ検討を行った。

7.2 実験方法

波力実験の対象とした構造は、スリット型、平面トラス型、水平板付スリット型、透過水平板付スリット型および改良空気密閉型の5タイプの構造である(図7.1～図7.5)。それぞれの構造については、前報¹⁾に詳しい。

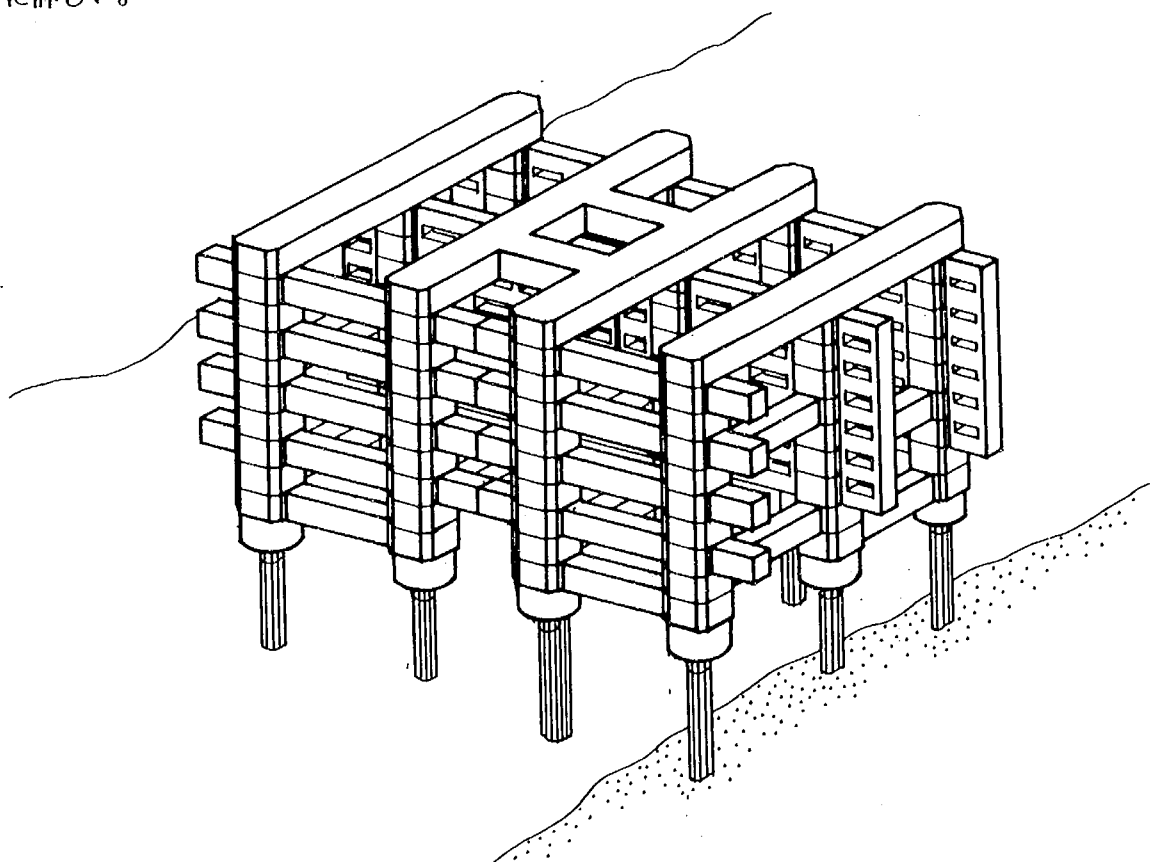


図7.1 スリット型構造

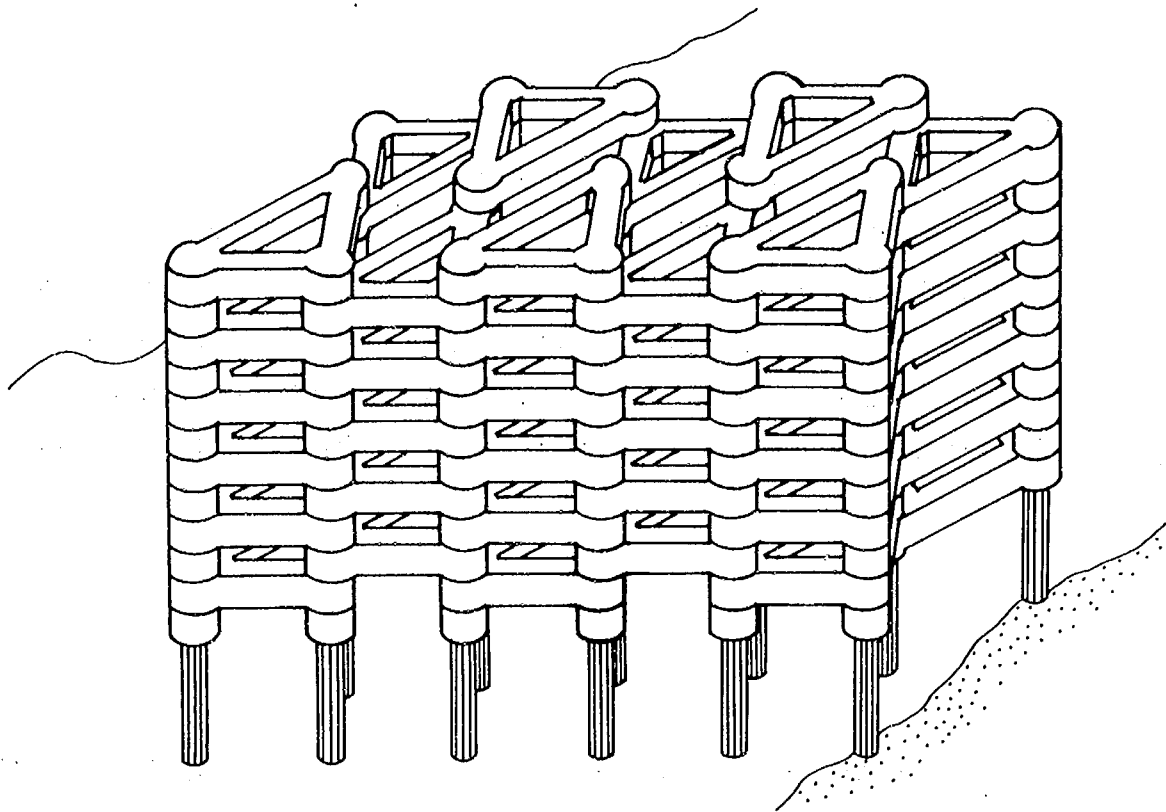


図 7.2 平面トラス型構造

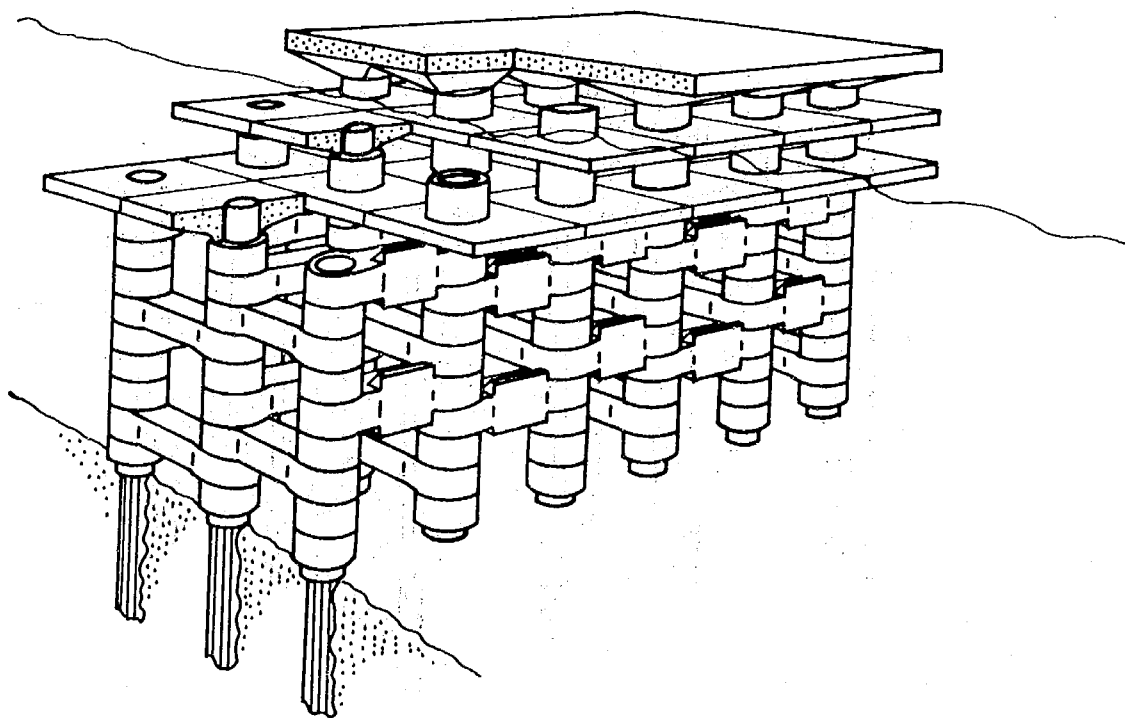


図 7.3 水平板付スリット型構造

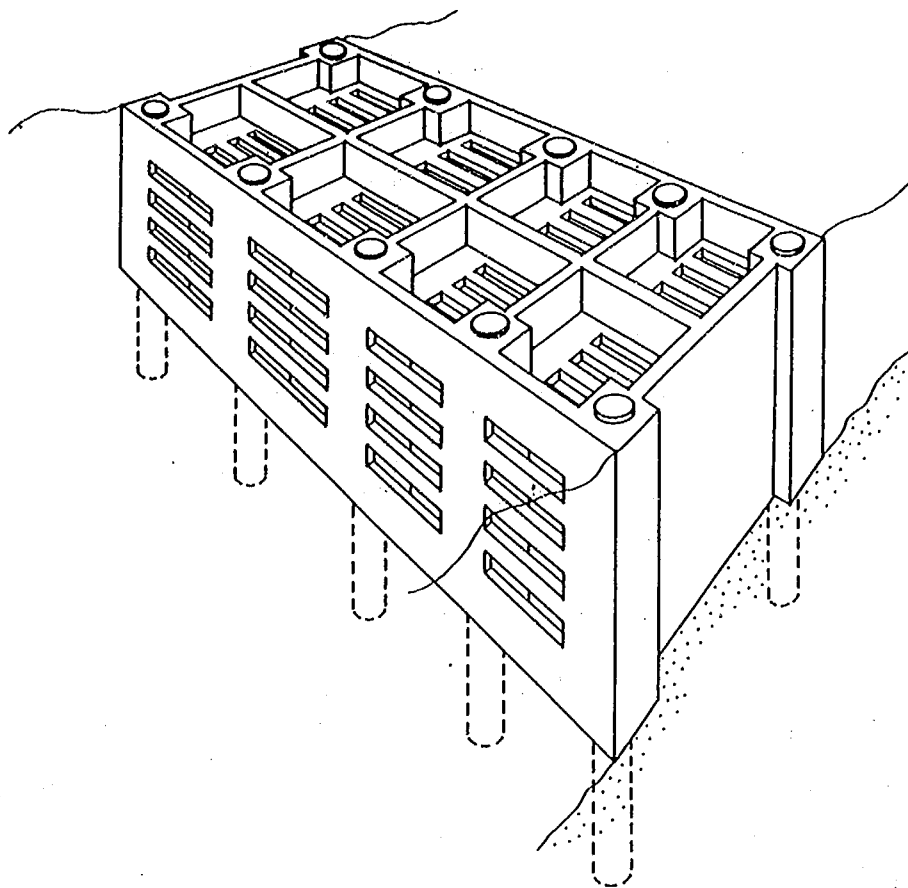


図 7.4 透過水平板付スリット型構造

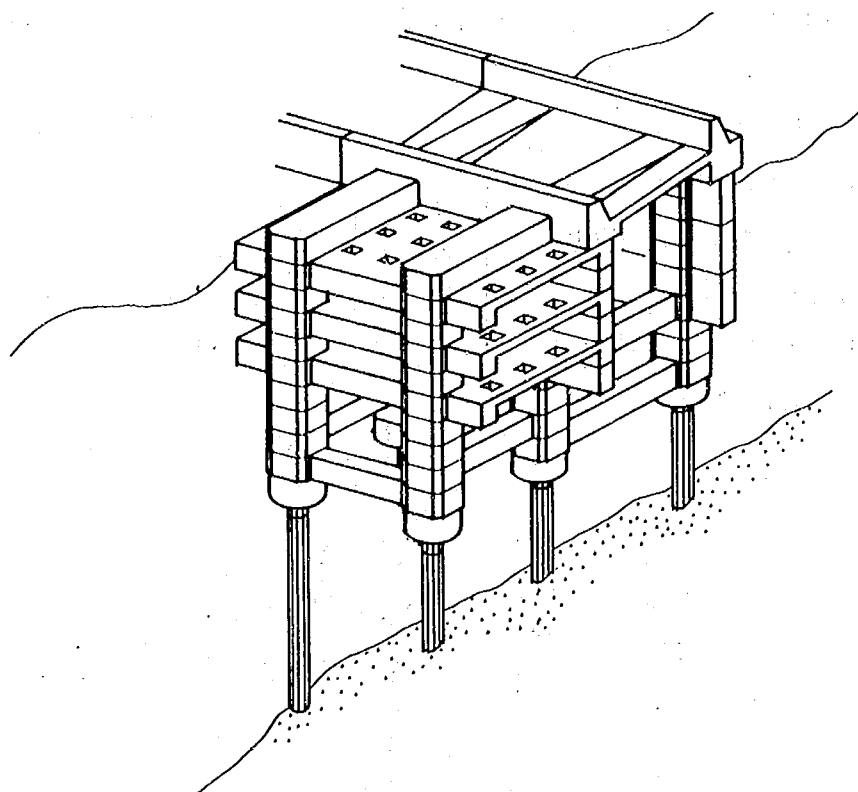


図 7.5 改良空気密閉型構造

実験は、建設省土木研究所波浪実験棟内の不規則波造波水路を用いた。水路は長さ 142 m、幅 0.6 m、高さ 1.4 m で水路端には油圧式不規則波造波装置が取り付けられている。水路床は図 7.6 に示すように造波

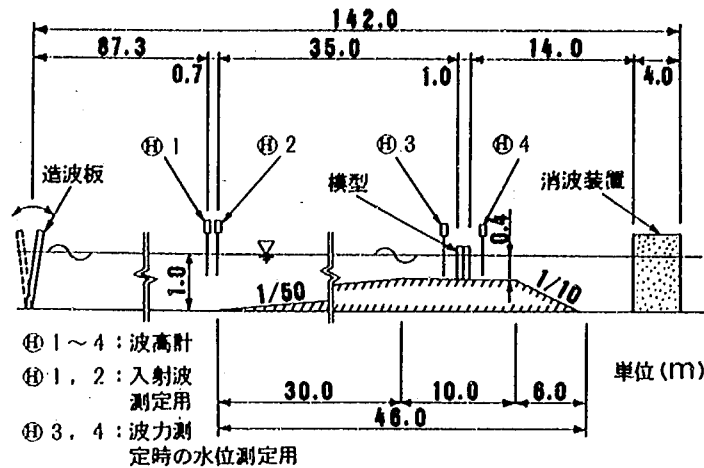


図 7.6 実験装置

板から 88 m の地点まで水平床で、そこから 30 m を勾配 1/50 の一様斜面とし、さらにこれより先 10 m を水平床とした。また、水平床より先 6 m は勾配 1/10 の一様斜面としてあり、水路端には消波装置を設けた。構造物模型の設置位置は、造波板から 123 m の地点であり、この部分は片面ガラス張りで側面からの観察が可能である。実験の縮尺は 1/25 であり、現地と模型との対比を表 7.1 に示す。また、実験波はすべて規則波であり、表 7.2 に示す 5 波波を選定した。各々の構造物の諸元は表 7.3 ~ 表 7.7 に示すように消波実験の場合と全く同様であり、構造物模型も同じものを用いた。構造物模型に作用する波力の測定には三分力検出器を用いた。三分力検出器は、その内部に歪みゲージが組み込まれてあり、この検出器に構造物模型を剛結することにより、水平力、鉛直力、モーメントの 3 成分を独立に計測することができる。実験においては、構造物模型を三分力検出器に剛結して水路上部より吊り下げた。なお、三分力検出器は水路上部の鋼製の架台に固定した(図 7.7 参照)。

表 7.1 現地と模型との対比

諸 元	実 物	模 型
水 深	10 m	40 cm
波 高	1 m ~ 4 m	4 cm ~ 16 cm
周 期	6 sec ~ 14 sec	1.2 sec ~ 2.8 sec

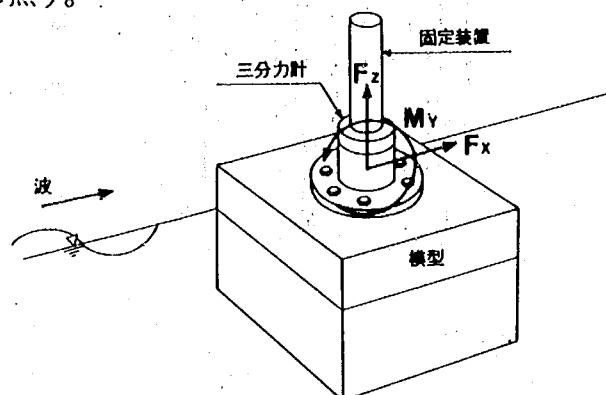


図 7.7 全波力測定装置

表 7.2 水 理 条 件

実験波 番 号	周 期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (cm)	沖波波長 L ₀ (cm)	沖波波形 勾 配 H ₀ /L ₀	波 高 H (cm)	波 長 L (cm)	波形勾配 H/L	相対水深 h/L
1	1.6	12	399	0.030	11.2	283	0.040	0.141
2	2.0	4	624	0.006	3.9	369	0.011	0.108
3	2.0	8	624	0.013	7.9	369	0.021	0.108
4	2.0	12	624	0.019	11.8	369	0.032	0.108
5	2.8	12	1223	0.010	13.3	535	0.025	0.075

表 7.3 構造条件 (スリット型)

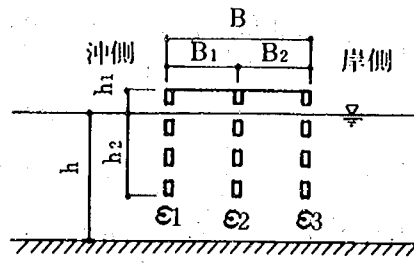
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件					実験模型諸量	記 号
	スリット 枚数	h ₂ /h	ε ₁	ε ₂	ε ₃		
SL1	2	0.7	0.3	—	0.1	h = 40 cm B/h = 1.5 B ₁ /B ₂ = 1.0 h ₁ /h = 0.5	
SL2	3	0.7	0.3	0.2	0.1		
SL3	3	0.7	0.3	0.2	0		
SL4	3	0.85	0.3	0.2	0.1		
SL5	3	1.0	0.3	0.2	0.1		

表 7.4 構造条件 (平面トラス型)

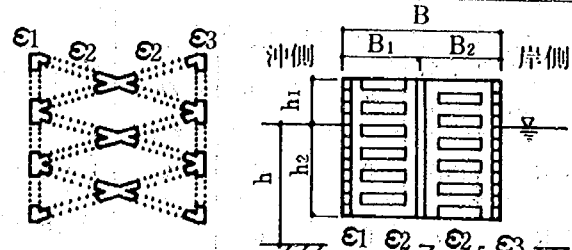
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件			実験模型諸量	記 号
	ε ₁	ε ₂	ε ₃		
TSL1	0.3	0.3	0.3	h = 40 cm B/h = 1.5 B ₁ /B ₂ = 1.0 h ₁ /h = 0.5 h ₂ /h = 0.7	
TSL2	0.4	0.3	0.3		
TSL3	0.3	0.2	0.3		
TSL4	0.2	0.2	0.2		

表 7.5 構造条件 (水平板付スリット型)

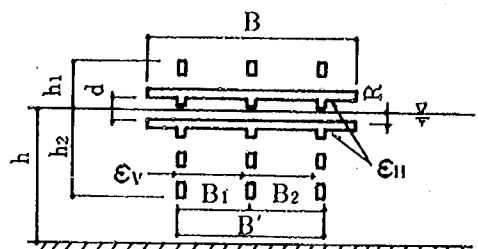
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件				実験模型諸量	記 号
	水平 板 枚数	d/h	ϵ_v	ϵ_H		
PLS 1	2	0.1	0.3	0.0	$h = 40\text{ cm}$ $B/h = 1.5$ $B'/h = 1.0$ $B_1/B_2 = 1.0$ $h_1/h = 0.5$ $h_2/h = 0.7$ $R/h = 0.05$ $d/h = 0.10$	
PLS 2	2	0.1	0.4	0.0		
PLS 3	1	—	0.4	0.0		
PLS 4	1	—	0.4	0.1		

表 7.6 構造条件 (透過水平板付スリット型)

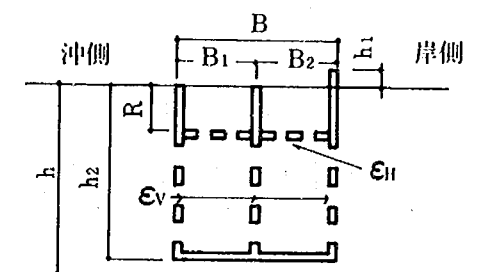
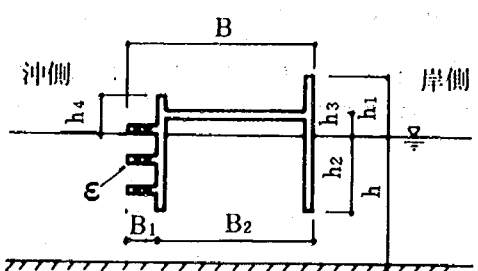
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件				実験模型諸量	記 号
	透 過 水平板 枚数	h_1/h	h_2/h	B/h		
VHS 1	0	0.0	1.0	1.25	$h = 40\text{ cm}$ $B_1/B_2 = 1.0$ $R/h = 0.1$ $\epsilon_v = 0.26$ $\epsilon_H = 0.18$	
VHS 2	1	0.0	1.0	1.25		
VHS 3	1	0.0	0.7	1.25		
VHS 4	1	0.15	1.0	1.25		
VHS 5	1	0.0	1.0	0.75		

表 7.7 構造条件 (改良空気密閉型)

構 造 ケ ー ス	構 造 条 件				実験模型諸量	記 号
	空気 室 条件	B_1/h	B_2/h	h_4/h		
AIR 1	密閉	0.2	1.0	0.4	$h = 40\text{ cm}$ $B/h = 1.2$ $h_1/h = 0.4$ $h_2/h = 0.5$ $h_3/h = 0.15$ $\epsilon = 0.3$	
AIR 2	開放	0.2	1.0	0.4		
AIR 3	密閉	0.2	1.0	0.2		
AIR 4	密閉	0.5	0.7	0.4		
AIR 5	密閉	0.5	0.7	0.2		

波高の測定は、構造物模型の前後10cmの位置に容量式波高計を設置し、三分力検出器による波力の測定と同時にを行った。(図7.6参照)

堤体への入射波高Hは、波力実験に先行して行った消波実験の結果を参考に定めた。すなわち、波力実験の5波浪は、消波実験の11波浪の中から選び出したものであり、造波装置のダイヤル値を同じ値にした場合、同一の実験波が再現するものとしている。波力および波高の測定は、動歪みアンプあるいは波高計アンプからの出力電圧をA/D変換器を通してデジタル値に変換し、小型計算機によりフロッピーディスクに記録して行った。データは表7.8に示すサンプリング間隔で10波分の測定を行った。また、測定の開始時刻は模型の位置に入射波が到達し安定した直後とした。

表 7.8 データサンプリング間隔

実験名	設定周期(sec)	データ・サンプリング間隔(ms)
波力実験	1.6, 2.0, 2.8	30

7.3 データの処理法

(1) 平均波力強度の算定

堤体に作用する全水平波力 F_x 、全鉛直波力 F_z は三分力検出器により算出できる。これらの分力の符号は、水平力が波の進行方向、鉛直力が上向きに作用するときをそれぞれ正と定義する。測定結果の整理にはそれぞれの分力の作用方向の投影面積(空隙も含めた面積)で除した平均波力強度 f_x および f_z を用いる。

$$f_x = \frac{F_x}{D(h_a + h_z)} \quad (7.1)$$

$$f_z = \frac{F_z}{B \cdot D} \quad (7.2)$$

$$h_a = \min[\eta^*/2, h_1] \quad (7.3)$$

ここに、

F_x : 堤体の全水平波力(測定値)(gf)

F_z : 堤体の全鉛直波力(測定値)(gf)

f_x : 堤体の平均水平波力強度(gf/cm²)

f_z : 堤体の平均鉛直波力強度(gf/cm²)

B : 堤体の岸沖方向の幅(cm)

D : 堤体の法線方向の幅(cm)

- h_1 : 堤体の天端高 (cm)
 h_2 : 堤体の吃水深 (cm)
 h_a : 静水面からの波圧の作用高 (cm)
 η^* : " 波の打ち上げ高 (cm)

式 (7.1) における平均水平波力強度 f_x を求める際の水平方向の投影面積の取り方については次のように考えた。平均水平波力強度 f_x を波力による分布荷重と等価な一様分布荷重に近いものにするために、 f_x の算定時の波圧の作用高 h_a を以下のように考えた。

① 堤体が高天端の場合 ($h_1 \geq \eta^*/2$)

図 7.8 に示すように堤体が高天端の場合、静水面より上の波圧の作用高を $h_a = \eta^*/2$ とし、堤体の下端から $h_2 + \eta^*/2$ の高さまで波力が一様分布するものとして f_x を算定した。

② 堤体が低天端の場合 ($h_1 < \eta^*/2$)

図 7.8 に示すように堤体が低天端の場合、静水面より上の波圧の作用高を $h_a = h_1$ とし、堤体の下端から天端までの $h_2 + h_1$ の高さに沿って、波力が一様分布するものとして f_x を算定した。

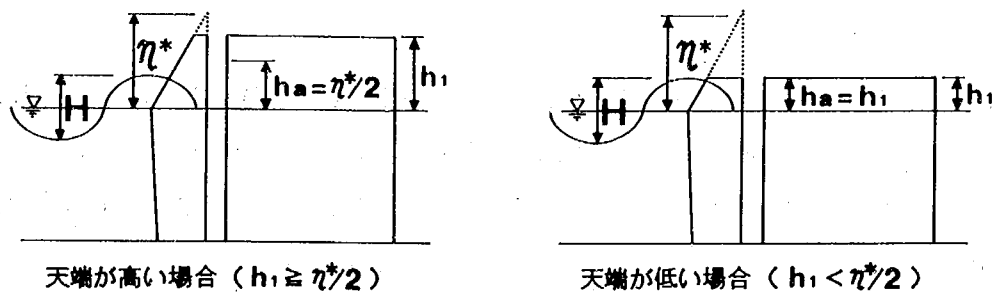


図 7.8 静水面からの波の仮想作用高 h_a

(2) 合田式による平均波力強度の算定

鉛直壁に空隙がない不透過性構造の場合の平均波力強度と測定結果より得られた透過性構造の平均波力強度とを比較するために、次に示すように合田式を用いて不透過性構造の場合の平均波力強度を算定する。

$$f_{gx} = \frac{F_{gx}}{D(h_a + h_2)} \quad (7.4)$$

$$f_{gz} = \frac{F_{gz}}{B \cdot D} \quad (7.5)$$

ここに、

- F_{gx} : 堤体の全水平波力 (合田式) (gf)
 F_{gz} : 堤体の全鉛直波力 (合田式) (gf)
 f_{gx} : 堤体の平均水平波力強度 (gf/cm²)

f_{0z} : 堤体の平均鉛直波力強度 (gf/cm^2)

であり, 他のパラメータは式 (7.1), 式 (7.2) の説明で用いたものと同様である。

合田式による堤体の全波力は次のようにして求める。

$$F_{0x} = \left\{ \frac{1}{2} (p_1 + p_3) h_2 + \frac{1}{2} (p_1 + p_4) h_1^* \right\} D \quad (7.6)$$

$$F_{0z} = \frac{1}{2} p_3 B D \quad (7.7)$$

ここに,

$$p_1 = \frac{1}{2} \alpha_1 w_0 H \quad (7.8)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh (2 \pi h / L)} \quad (7.9)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (7.10)$$

$$p_4 = \left(1 - \frac{h_1^*}{\eta^*} \right) p_1 \quad (7.11)$$

$$h_1^* = \min [\eta^*, h_1] \quad (7.12)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4 \pi h / L}{\sinh (4 \pi h / L)} \right] \quad (7.13)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h_2}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh (2 \pi h / L)} \right)^2 \quad (7.14)$$

$$\eta^* = 1.5 H \quad (7.15)$$

式 (7.6) はもともと不透過性構造物の波力を算定するためのものであり, 透過性構造物の波力はこれより小さいと考えられる。そこで, どの程度小さいかを定量的に調べるため, 各タイプごとに測定値と計算値の比について検討する。この比の値を λ とすれば, λ は次式で計算される。

$$\lambda = \frac{F_x}{F_{0x}} = \frac{f_x}{f_{0x}} \quad (7.16)$$

各構造タイプの実験結果より求まる λ の上限値は, 重複波領域において各構造タイプの波力を合田式で算定する場合の低減係数とみなすことができる。

7.4 実験結果

7.4.1 スリット型*

(1) 波力の作用状況

分力計による測定記録の一例として, 波高 $H_0 = 12.0 \text{ cm}$, 周期 $T = 2.8 \text{ s}$ の波浪条件の下でのスリ

* 執筆: 萩原運弘 (清水建設株式会社技術研究所)

ット型模型 (SL4) 前面および後面の水位変動 η_1 , η_2 と模型全体に作用する水平波力 F_x および鉛直波力 F_z の時間波形を図 7.9 に示す。模型前面水位 η_1 と水平波力 F_x はほぼ同位相で変動している。すなわち模型の前面水位が最大になった時、模型には波の進行方向に最大の水平波力が働いている。また、その時刻での模型後面の水位は上昇中で、ちょうど静水面を切る位置にある。一方、鉛直波力の正の最大値は水平波力のそれに比べて非常に小さく、主要な水平部材を持たないスリット型では作用する $Uplift$ も小さくなることが推察される。さらに、鉛直波力の正の最大値は水平波力のそれよりも若干先行して現れており、通常の混成堤のように鉛直波力と水平波力は同時に正のピークを示さない。

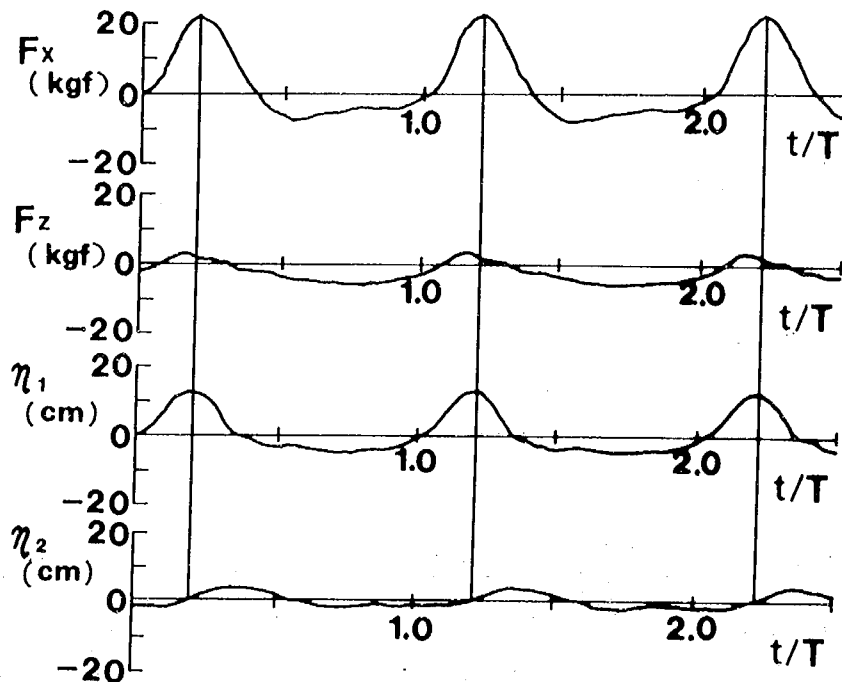


図 7.9 スリット型の波力および水位の時刻歴波形
(SL4, $T = 2.8 \text{ sec}$, $H_0 = 12 \text{ cm}$)

(2) 波力特性

吃水比がそれぞれ異なる SL2 ($h_2/h = 0.70$), SL4 ($h_2/h = 0.85$) および SL5 ($h_2/h = 1.0$) の場合の無次元平均水平波力強度 $f_x/w_0 H$ と相対幅 B/L との関係を図 7.10 に示す。ここに、 w_0 は水の単位体積重量 (gf/cm^3)、また図中の破線は実験値の平均を結んだものである。 $f_x/w_0 H$ は B/L が小さいほど、すなわち周期 T の長い波ほど大きな値を示している。スリット型模型全体に働く波力は模型を構成する各スリット壁に作用する部材波力の総和であるので、周期の長い波ほど三枚のスリット壁はほぼ同時に波力を受けるようになる。このため全波力も大きくなる。これに対して、周期の短い波では三枚のスリット壁に働く各部材波力に位相差が生じるため、全波力として

は小さくなると考えられる。次に、鉛直波力についても水平波力の場合と同様に、無次元鉛直力強度 $f_z/w_0 H$ と相対幅 B/L の関係を図 7.11 に示す。値そのものは小さいが、やはり水平波力の場合と同様の傾向が認められる。

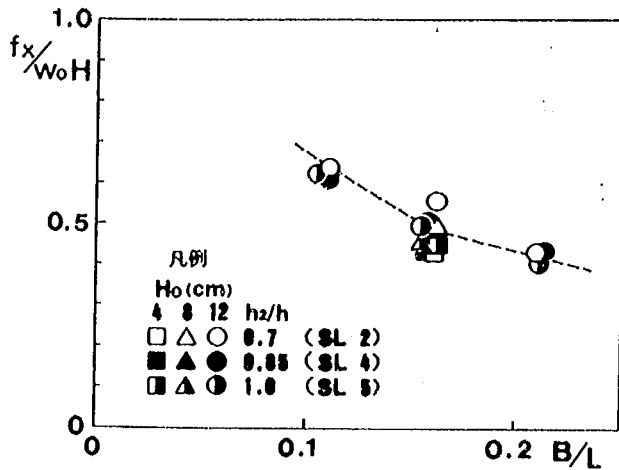


図 7.10 スリット型 (SL2, SL4, SL5) の $f_x / w_0 H$ と B/L の関係

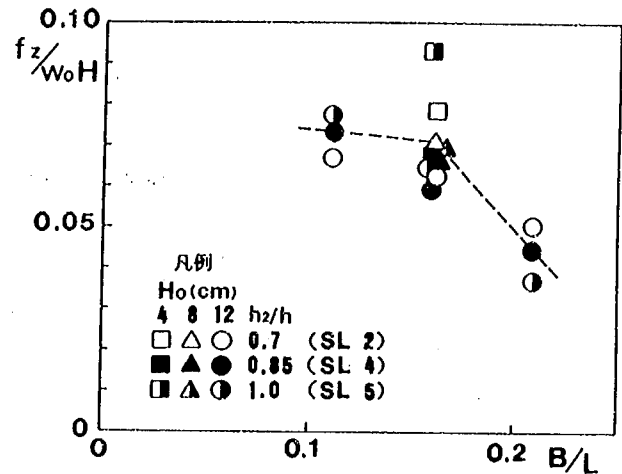


図 7.11 スリット型 (SL2, SL4, SL5) の $f_z / w_0 H$ と B/L の関係

(3) 合田波力との比較

スリット型海域制御構造物の波力算定式を一般式の形で規定することは現時点では困難であるので、合田式を準用するのが便利であると思われる。その場合、どの程度の波力の低減を行えばよいかが問題になる。今回は重複波を用いた波力実験ではあるが、吃水比がそれぞれ異なる SL2 ($h_2/h = 0.70$)、SL4 ($h_2/h = 0.85$)、SL5 ($h_2/h = 1.0$) の場合の水平波力の測定値 F_x を合田式から求めた全水平波力 F_{0x} で除して、相対幅 B/L に対してプロットしたのが図 7.12 である。 F_x / F_{0x} の値は吃水比 h_2/h の相違により若干のばらつきが見られるが、大部分は 0.65 以下の範囲に分布している。 F_x / F_{0x} の値は近似的に波力の低減係数 λ と考えてよく、今回の実験の範囲では、ほぼこれらの上限に近い値として $\lambda \approx 0.65$ 程度を与えればよいと考えられる。また、 B/L の小さいところ、すなわち周期が長い波に対して F_x / F_{0x} の値が若干大きくなる傾向を示しているが、今回は実験データが少ないので F_x / F_{0x} と B/L との関係について詳しい議論を行うことができない。

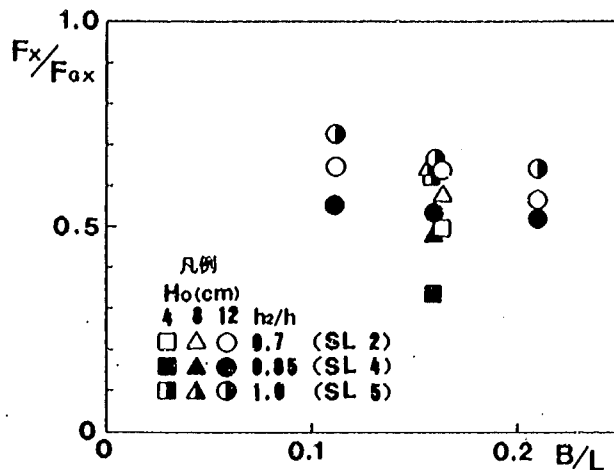


図 7.12 スリット型 (SL2, SL4, SL5) の F_x / F_{ox} と B / L の関係

(4) ま と め

- ① 模型前面の水位 η_1 が最大になった時，模型には波の進行方向に最大の水平波力 F_x が働くが，鉛直波力の最大値は水平波力のそれよりも若干先行して現れている。また，スリット型の鉛直波力は水平波力に比べて非常に小さい。
- ② 無次元平均水平波力強度 $f_x / w_0 H$ は相対幅 B / L が小さいほど，すなわち周期 T の長い波ほど大きな値を示す。これは，三枚のスリット壁が周期の短い波では位相差をもって波力を受けるが，周期の長い波ではほぼ同時に波力を受けるためと考えられる。
- ③ 水平波力の実測値 F_x を合田式から求めた全水平波力 F_{ox} で割った F_x / F_{ox} の値は，大部分が 0.65 以下の範囲にあり，このことから波力の低減係数 λ としては，これらの上限に近い値 $\lambda \approx 0.65$ 程度を与えればよいと考えられる。

7.4.2 平面トラス型 *

(1) 波力の作用状況

波力測定結果の一例として，TSL4 の水平波力 F_x ，鉛直波力 F_z ，堤体沖側の水位 η_1 および堤体岸側の水位 η_2 の波形を図 7.13 に示す。波浪条件は，周期 $T = 2.8 \text{ sec}$ ，換算沖波波高 $H_0 = 12 \text{ cm}$ である。これより次のことがわかる。

- ① 水平方向波力 F_x の最大値は，堤体沖側の水位 η_1 の最大時に現れる。
- ② 鉛直方向波力 F_z の最大値は， F_x のピークより若干先行して現れ，その最大値は水平方向波力 F_x のピーク値の約 $1 / 4$ と小さい。
- ③ 堤体岸側の水位 η_2 の振幅は，堤体沖側の水位 η_1 の振幅の約 0.4 倍と小さく，位相は約 $T / 8$ だ

* 執筆：岡 幸夫（飛島建設株式会社総合企画本部技術開発部）

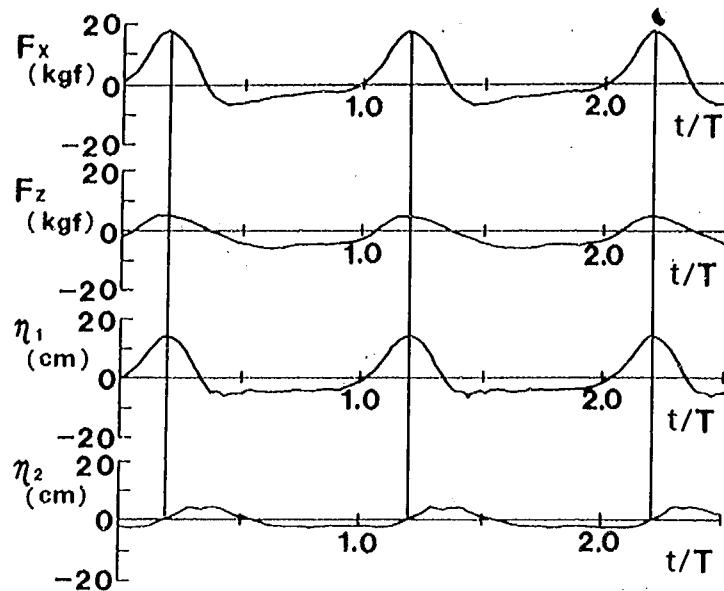


図 7.13 平面トラス型の波力および水位の時刻歴波形
(TSL4, $T = 2.8 \text{ sec}$, $H_0 = 12 \text{ cm}$)

け遅れている。

非砕波時に構造物に作用する波力は、沖側の水位と岸側の水位との差が最も大きい時に最大になると考えられる。したがって、 η_1 が最大の時 F_x は最大となる。

(2) 波力特性

TSL4の平均水平波力強度 f_x を無次元化した量 $f_x / w_0 H$ と構造物の相対幅 B/L との関係を図7.14に示す。これより次のことがわかる。

- ① B/L が0.11～0.21へと増加するに伴い、 $f_x / w_0 H$ は0.61～0.42と減少する。
- ② $B/L = 0.16$ の場合波高が高くなるほど $f_x / w_0 H$ の値は大きくなる。

構造物に作用する水平波力は、波高が同じ場合には周期が長いほど、すなわち B/L が小さいほど大きくなる。周期が長いと各々の鉛直スリット壁が同時に波力を受けるので、水平波力の合力が大きくなると考えられる。逆に短周期の場合には、各々の鉛直スリット壁の波長に対する相対的な位置のず

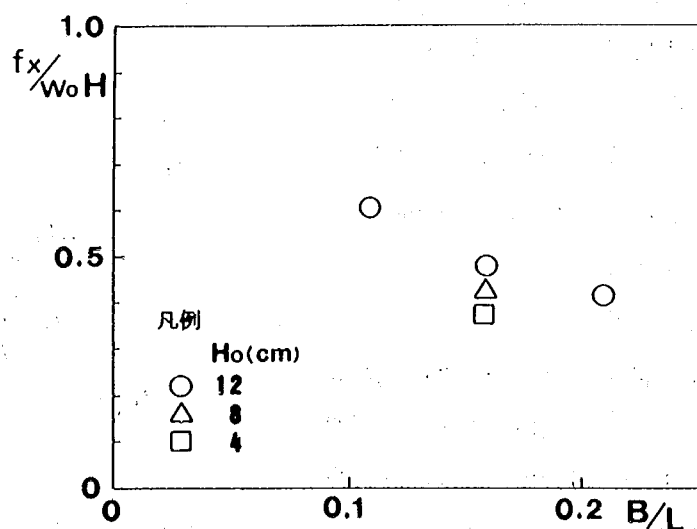


図 7.14 平面トラス型 (TSL4) の $f_x / w_0 H$ と B/L の関係

れが大きくなるために、全体として受ける波力は長周期の場合に比べて小さくなると考えられる。次に、TSL4の平均波力強度の無次元量 f_z/w_0H 構造物の相対幅 B/L との関係を図7.15に示す。これより、 B/L が0.11~0.22に変化しても、 f_z/w_0H の値はほぼ一定であり、約0.1と水平波力強度に比べて小さいことがわかる。

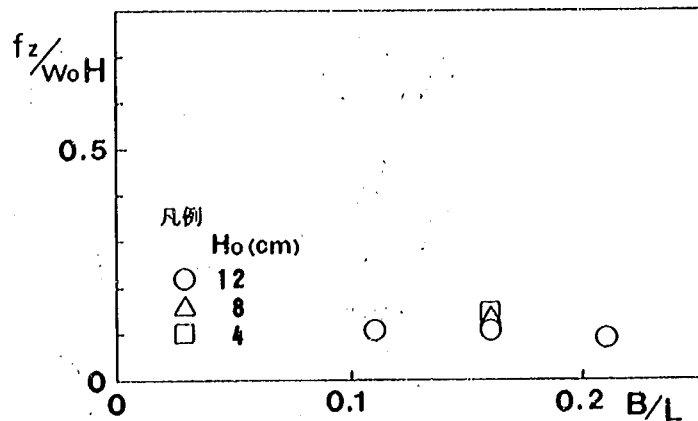


図7.15 平面トラス型 (TSL4) の f_z/w_0H と B/L の関係

(3) 合田波力との比較

図7.14に示したように平面トラス型の水平波力強度は、 B/L の増加にしたがって減少する傾向がある。この傾向は、不透過堤に対して合田式を適用した場合にも認められる。透過性構造物に対する波力を検討するために、堤体を不透過堤として合田式を適用した場合との比較を行う。水平波力の測定値 F_x と合田式から求められる波力 F_{0x} との比 F_x/F_{0x} と相対幅 B/L の関係を図7.16に示す。相対幅 B/L 、波高 H_0 による若干のばらつきはあるが F_x/F_{0x} の値は0.62以下となっている。このようにTSL4に関しては合田波力に対する波力の低減係数 λ として $\lambda=0.6$ 程度を与えればよいと考えられる。 F_x/F_{0x} は相対幅 B/L の減少に対し、若干増加する傾向がある。また、 $B/L=0.16$ の条件では波高を変化させた場合の実験値があり、波高の増大とともに F_x/F_{0x} の値は増加する傾向がある。

しかし、 F_x/F_{0x} の相対幅 B/L や波高 H に対する関係については、現段階では実験データ数がないので詳細な検討はできない。この点については、今後検討する必要がある。

(4) まとめ

- ① 水平波力 F_x は、沖側水位 η_1 が最大のときに最大値をとる。鉛直波力 F_z の最大値は、水平波力の最大値に比べて小さく、また位相は鉛直波力の最大値の方が若干先行する。

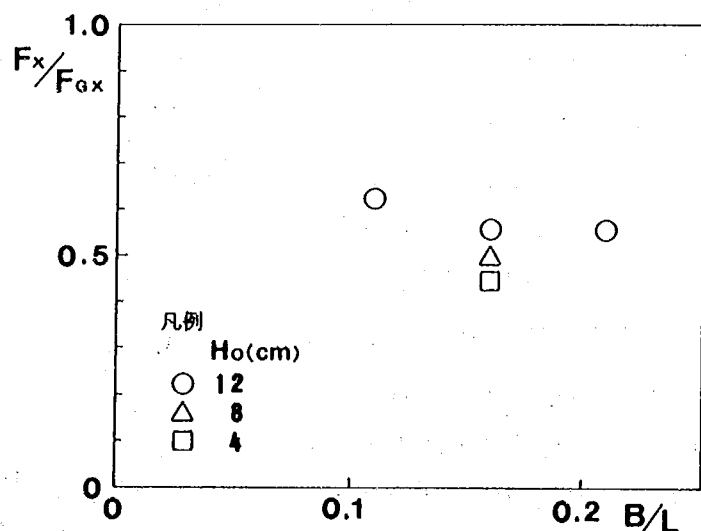


図7.16 平面トラス型 (TSL4) の F_x/F_{0x} と B/L の関係

- ② 水平波力強度は B/L の増加，すなわち周期の減少に対して減少する傾向があり，この傾向は不透水性構造物に対して合田式を適用した場合と同様である。
- ③ 空隙率が 0.2 の平面トラス型の場合，水平波力の実験値 F_x と合田式より求まる水平波力 F_{ox} との比 F_x / F_{ox} は 0.62 以下となる。これより合田波力に対する波力の低減係数 λ は $\lambda = 0.6$ 程度とすればよい。

7.4.3 水平板付スリット型*

鉛直スリットの空隙率 ϵ_v ，および水平板の空隙率 ϵ_H を変化させた時の構造物に作用する水平方向，および鉛直方向の全波力を調べた。水平波力については，鉛直壁に作用する合田波力²⁾との比較を行い，鉛直波力については，等分布と仮定した波力を考え，その波力特性を調べた。

(1) 波力の作用状況

水平板付スリット模型 (PLS4) に対し，沖波波高 $H_0 = 12\text{cm}$ ，周期 $T = 2.8$ 秒の波浪を作用させた場合の模型の前，後面の水位変動 η_1 ， η_2 と構造物全体に作用する水平波力 F_x ，鉛直波力 F_z の時間波形を図 7.17 に示す。 η_1 ， F_x はほぼ同位相で変動しており，模型の前面の水位が最大になったとき，岸向きに最大の水平力が働く。このとき上向きに鉛直波力が作用しているが，岸向き水平波力と上向き鉛直波力がそれぞれ最大となる時刻は一致しない。一方，模型の前面の水位が最小になったときは逆の傾向となる。この傾向は水平板付スリットの他の模型においてもほぼ同様である。

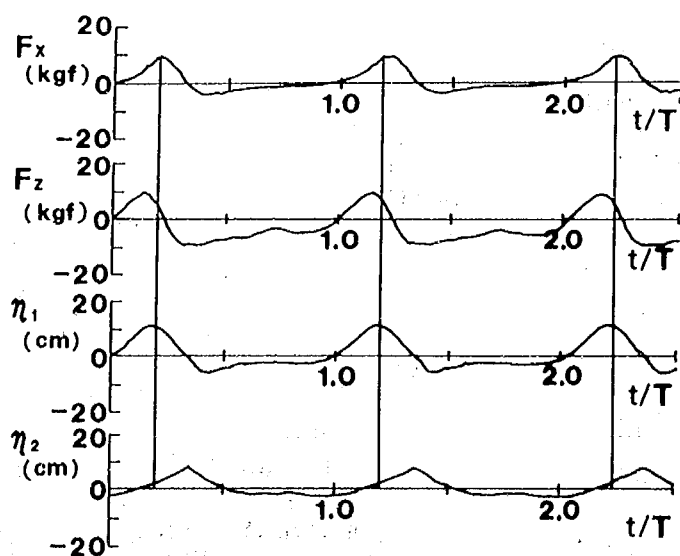


図 7.17 水平板付スリット型の波力および水位の時刻歴波形
(PLS4, $T = 2.8 \text{ sec}$, $H_0 = 12\text{cm}$)

* 執筆：高木春生・吉川雅人（三井建設株式会社 土木本部土木技術部）

(2) 波力特性

鉛直スリットの空隙率 ϵ_v の波力に対する影響を調べるために無次元波力 $f_x / w_0 H$ と相対幅 B/L との関係を図 7.18 に示す。ここに、 f_x は平均水平波力強度で、岸向きを正とする。ここでは $\epsilon_v = 0.3$ の PLS1 と $\epsilon_v = 0.4$ の PLS4 を比較した。岸向き無次元波力は、通常の直立堤のように B/L が小さくなる、つまり波長が長くなるに従って増大する傾向が認められる。また鉛直スリットの空隙率 ϵ_v が 0.3 と 0.4 では、 ϵ_v

$= 0.3$ の方が平均 35% 程度波力が大きい。一方、沖向き無次元波力は、 B/L に関する顕著な傾向を持たない。さらに、空隙率が変化しても、ほとんど差は見られない。水平板の空隙率 ϵ_H の波力に対する影響を調べるために無次元波力 $f_z / w_0 H$ と相対幅 B/L との関係を図 7.19 に示す。ここに、 f_z は平均鉛直波力強度で、上向きを正とする。ここでは、水平板に空隙のない PLS3 と、水平板の空隙率 $\epsilon_H = 0.1$ の PLS4 を比較した。 $f_z / w_0 H$ は B/L による顕著な変化は認められず、その値も同程度であり、その上限値は PLS3 で約 0.37、PLS4 で約 0.24 である。水平板の空隙率を 0.1 とすると空隙のないものに比べ無次元鉛直波力は平均 35% 程度低減する。

(3) 合田波力との比較

水平波力の実験値 F_x と合田式による全水平波力 F_{Gx} の比と B/L との関係を図 7.20 に示す。ここでは PLS4 の結果を示した。 F_x / F_{Gx} は B/L に関係なくほぼ一定の値を示し、それぞれの上限值は岸向きで約 0.35、沖向きで約 0.2 である。

また、鉛直波力については、合田

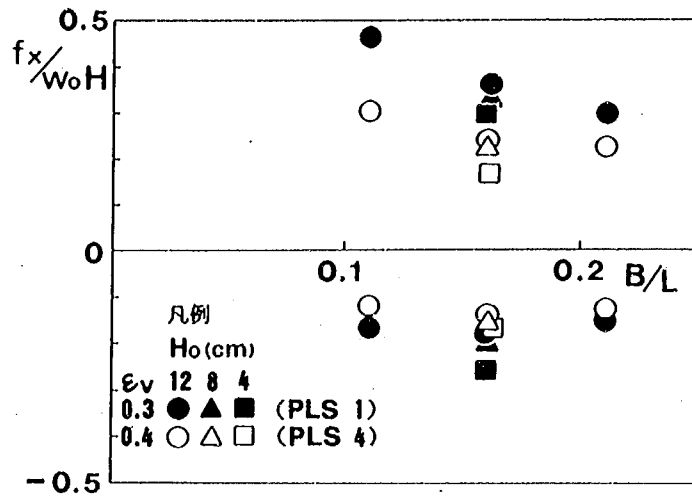


図 7.18 水平板付スリット型 (PLS1, PLS4) の $f_x / w_0 H$ と B/L の関係

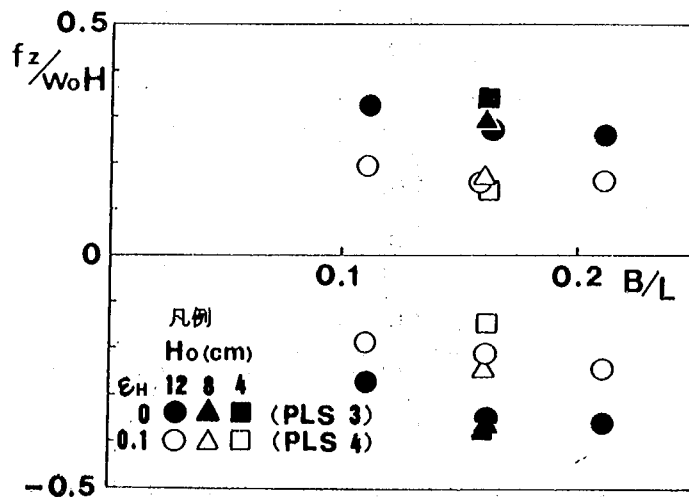


図 7.19 水平板付スリット型 (PLS3, PLS4) の $f_z / w_0 H$ と B/L の関係

式による揚圧力²⁾との比較は特にしない。つまり、本構造は底版がなく、水面付近に設置された水平板を有する透過堤であり、底版を有する不透過堤を前提とし、堤体前後の水圧差による揚圧力分布を考える合田式とは異なるからである。このため、水面付近の水平板には等分布波力が作用するものとする。水面付近の水平板に作用する鉛直波力は等分布と仮定して $\alpha w_0 H$ と表すと、図 7.19 より、PLS4 では α は約 0.2 となる。

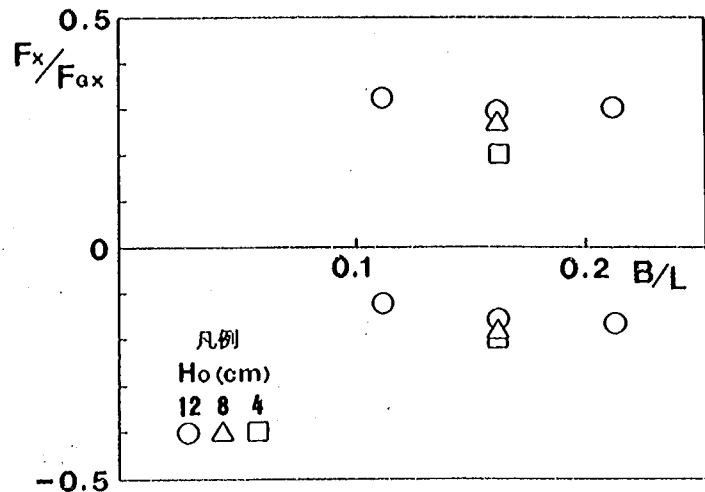


図 7.20 水平板付スリット型 (PLS4) の F_x / F_{0x} と B/L の関係

(4) ま と め

- ① 鉛直スリットの空隙率が 0.4 から 0.3 にすると、水平波力強度は平均 35% 程度増加する。
- ② 水平板の空隙率を 0.1 とすると空隙のないものに比べ平均 35% 程度鉛直波力が低減する。
- ③ PLS4 タイプの構造物に作用する岸向き、および冲向きの水平波力は、合田式の全水平波力に対し、上限値でそれぞれ 0.35 および 0.2 倍程度である。また、上向き、および下向きの鉛直波力は、等分布と仮定して、共に $0.2 w_0 H$ 程度である。F・S 調査³⁾の設計波力は、この実験結果に基づいている。

7.4.4 透過水平板付スリット型*

透過水平板付スリット型は、天端が静水面と一致した 3 枚の鉛直スリット壁を、水面付近にスリット式の透過水平板を、また底版に不透過板を配置した構造である。以下では、透過式堤体である本構造物に波が作用したときの波力の作用状況、波力特性、合田式波力との比較について述べる。

(1) 波力の作用状況

波力実験における波形記録の一例を図 7.21 に示す。これは、実験波周期 2.8 sec、波高 12.0 cm と比較的長周期の非碎波の条件である。図には、前面と後面の水位波形記録 η_1 、 η_2 も示した。本構造物は透過式構造物であるため、水平力は岸向きと冲向きの力が、また、鉛直力は正、負の揚圧力が交番荷重として作用する。ここに、 F_x は岸向きを正、 F_z は上向きの鉛直力を正とし以下これを単に揚圧力と呼ぶ。このような交番荷重に基づいて実験結果を整理すると、水平力は岸向きの波力が、鉛直力は揚圧力の方が大きい。設計における構造物の断面は、最大波力によって決定されるので、以下の検討は岸向き波力および揚圧力に注目して検討する。図 7.21 に示したように岸向き波力の最大値と揚圧力の最大値を示す時刻はずれており、揚圧力の最大値の方が約 $1/8 \sim 1/10$ 周期だけ早く発生する。今回の実験ではいずれの周期に対してもほぼ同様の傾向が得られた。

* 執筆：国栖広志（五洋建設株式会社 技術研究所）

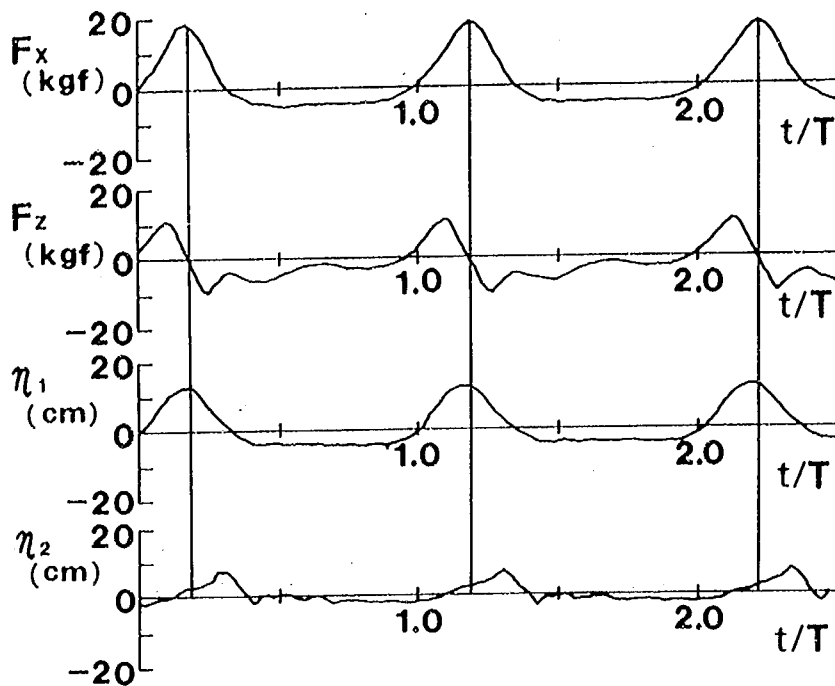


図 7.21 透過水平板付スリット型の波力および水位の時刻歴波形
(VHS 2, $T = 2.8 \text{ sec}$, $H_0 = 12 \text{ cm}$)

水平力の波形の位相は、堤体前面で計測した水位波形 η_1 とほぼ一致しており、前面水位が最高のときに岸向き水平力が最大となる。これは、一般の不透過混成堤の結果とほぼ同様の傾向である。一方、揚圧力は、 η_1 が最大のときにはほとんどゼロとなる。これは他のケースについても同様であり、通常の不透過混成堤と著しく異なった特徴である。透過堤の鉛直力は、各部材に作用する上面と下面の圧力差によって発生する。このうち、揚圧力は下面の圧力が上面の圧力より大きい場合に生じる現象である。本構造物の場合 η_1 が最大のとき堤体はすでに波をかぶっており、上面の圧力が増加傾向にある。このため、揚圧力が相対的に減少するものと考えられる。今回の実験波形の生データから水平力が最大のときの揚圧力の値、および、揚圧力が最大のときの水平力の値について整理すると、平均的には岸向きの水平力最大時の揚圧力の大きさは最大揚圧力の 0.45 倍、揚圧力最大時の岸向き水平力の大きさは最大水平力の 0.6 ~ 0.8 倍程度である。

(2) 波力特性

透過水平板付スリット型の波力特性に関しては、本構造物の基本型であり試設計³⁾にも適した VHS 2 および VHS 5 型をもとに検討する。VHS 5 型は VHS 2 型と同じ着底式であるが、堤体幅を短くしたケースである。また、透過水平板の揚圧力については VHS 1 型を、構造物の周辺で局所洗掘を受け着底式で無くなった場合の波力については VHS 3 型を用いて検討する。以下、水平力および揚圧力の検討は、各波力を波高および水の単位体積重量で除した無次元波力係数 $f_x / w_0 H$, $f_z / w_0 H$ を用いて行う。VHS 2 および VHS 5 型を用いた場合の波力特性を相対堤体幅 B/L (B : 堤体幅, L : 波長) で整理した結果を図 7.22 に示す。両者の結果から、同一の波を作用しているにもかか

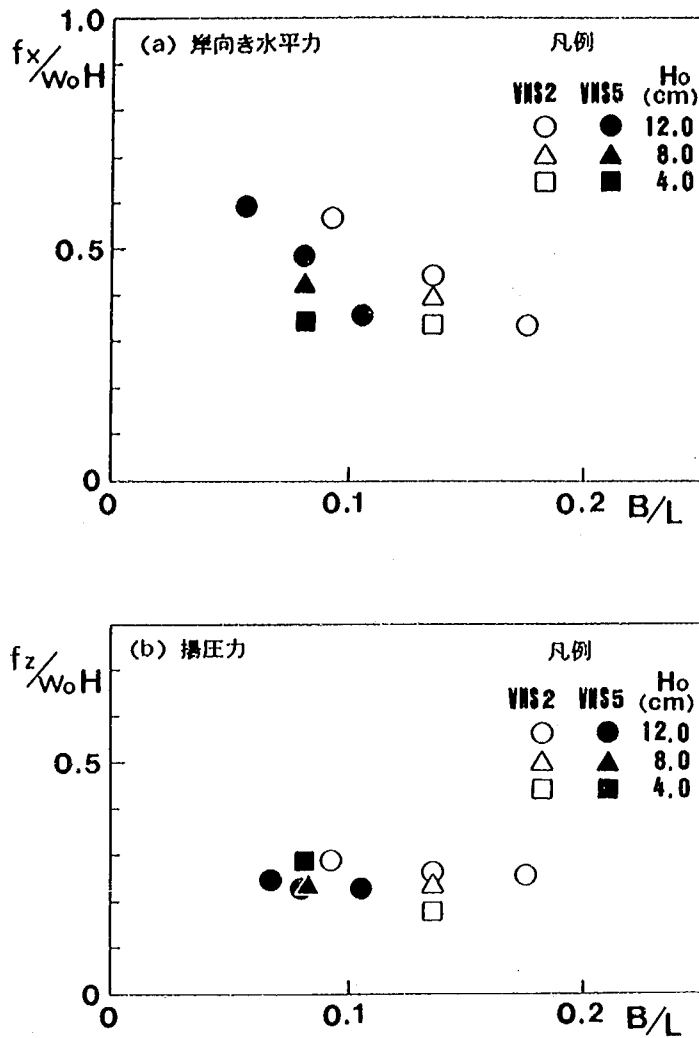


図 7.22 透過水平板付スリット型(VHS2, VHS5)の $f_x / w_0 H$ および $f_z / w_0 H$ と B/L の関係

わらず波力係数は一致せず、本構造物に関しては B/L をパラメータにして整理するには多少無理があるように思われる。そこで、波の周期特性を含んだ代表的パラメータとして相対水深 h/L (h : 水深) を用いて岸向き水平波力係数について整理した(図 7.23)。図より水平波力は VHS2 型に比べて堤体幅の小さい VHS5 型の方が若干大きくなるものの、ほぼ統一的に整理できることが分かる。そこで、以下の検討では独立変数として h/L を選ぶ。基本型の水平波力は図 7.23 (a) に示すように h/L が減少するにしたがい単調に増加する傾向を示す。これは長周期波ほど波力係数が増加することを意味し、不透過混成堤の特性と同様の傾向となる。そこで、本構造物に対しても合田波力式を準用しうると考えられる。一方、基本型の揚圧力は図 7.23 (b) に示すように、 h/L が変化してもその係数は 0.2 ~ 0.3 ではほぼ一定値をとる。これは、 h/L の増加とともに揚圧力も増加する不透過混成堤の特性とやや異なった傾向である。この理由は、揚圧力の発生機構が透過堤特有のものであることに起因している。

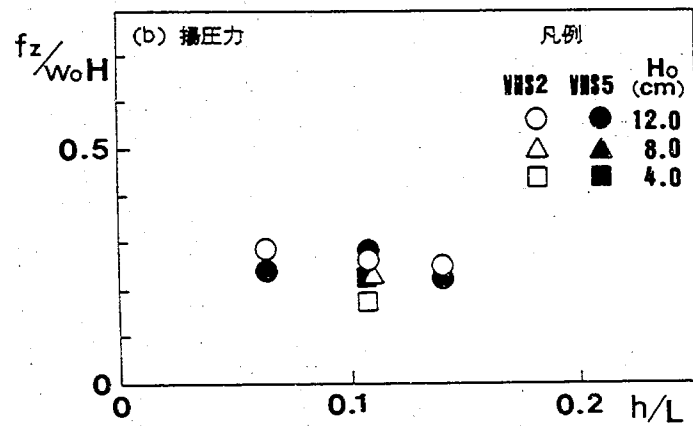
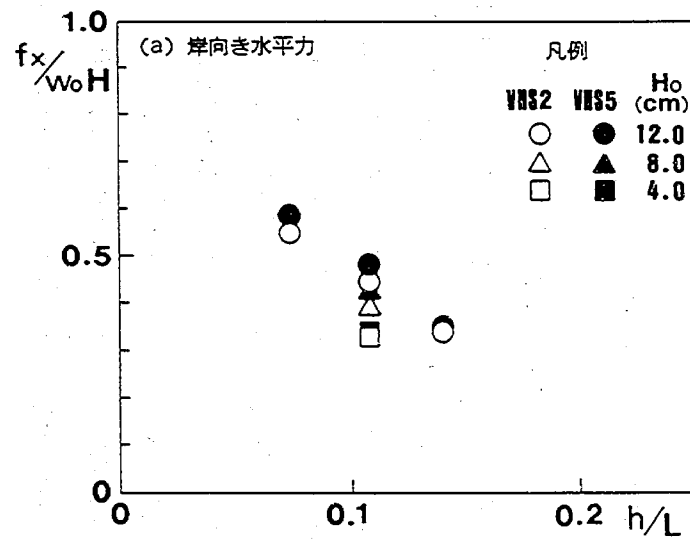


図 7.23 透過水平板付スリット型 (VHS 2, VHS 5) の f_x/w_0H および f_z/w_0H と h/L の関係

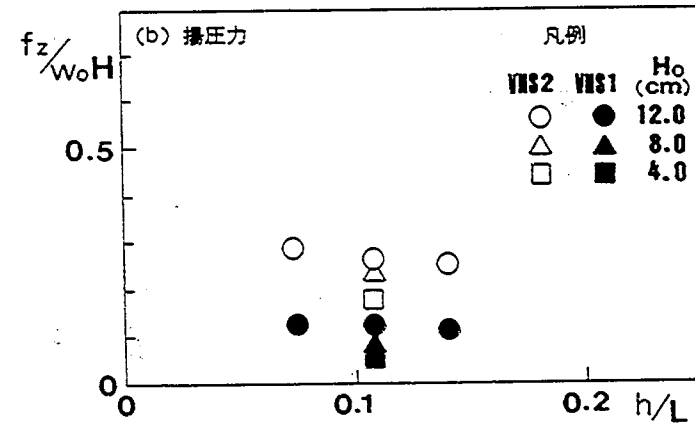
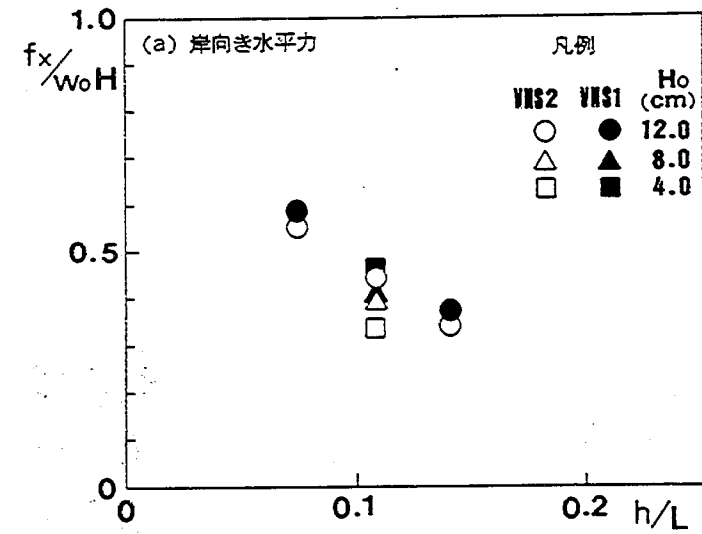


図 7.24 透過水平板付スリット型 (VHS 1, VHS 2) の f_x/w_0H および f_z/w_0H と h/L の関係

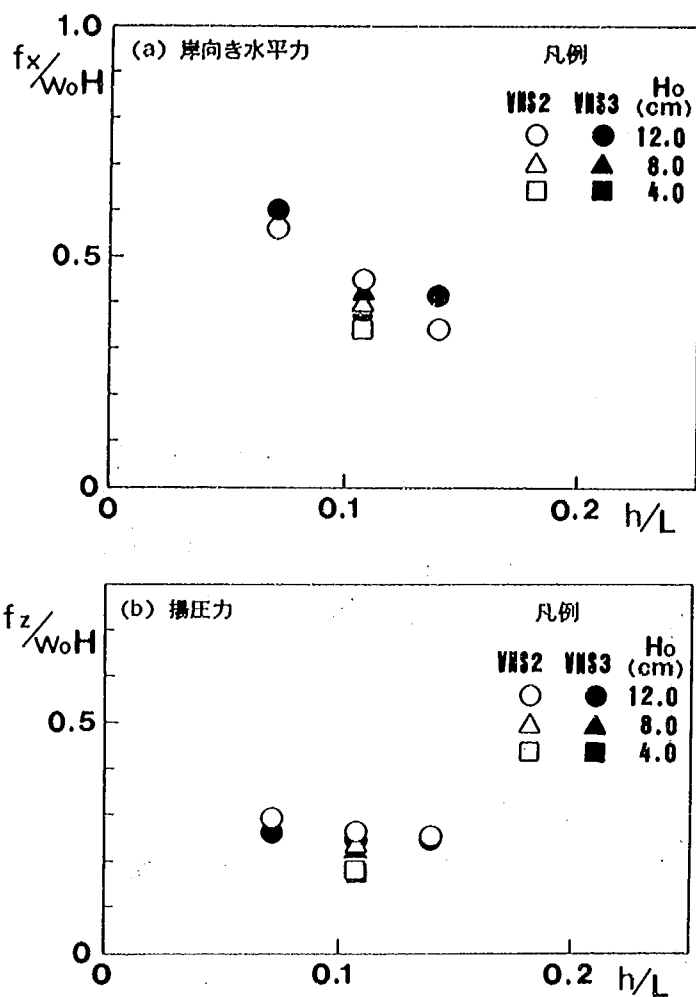


図 7.25 透過水平板付スリット型 (VHS2, VHS3) の f_x/w_0H および f_z/w_0H と h/L の関係

透過水平板に働く揚圧力は、主に透過水平板と不透過な底版が存在するために生ずると考えられるので、透過水平板の無い VHS 1 型と透過水平板を有する VHS 2 型の揚圧力の測定値を比較することにより、透過水平板と不透過な底版の揚圧力の分担比率について比較する。VHS 1 と VHS 2 型の波力実験の結果を図 7.24 に示す。図 7.24 から VHS 2 型に働く揚圧力は VHS 1 型に比べて約 2 ～ 4 倍となるが、比較的高波高の波に対しては 2 倍程度である。これらの結果から、透過水平板に作用する揚圧力の約半分を分担していることが分かる。一方、水平力は両タイプともほぼ同じ傾向を示しており著しい違いは認められない。着底式である本構造物が、局所洗掘を受け底版下面が通水状態となったときの波力特性について検討する。本構造物の実験条件は、VHS 2 型の吃水比が $h_2/h = 1.0$ 、VHS 3 型の吃水比が $h_2/h = 0.8$ である。両タイプの波力実験結果を図 7.25 に示す。これによると水平波力および揚圧力は、 h/L の小さい領域において、吃水比が $h_2/h = 0.8$ の VHS 3 の方が若干大きくなるものの、全体的にはほとんど同じ傾向である。

(3) 合田波力との比較

本構造物に対する水平波力特性は、 h/L で整理すると力の大きさは違うが混成式防波堤の波力とほぼ同様の傾向を示す。そこで、本構造物に作用する波力を合田波力式と比較した(図7.26)。ただし、本構造物の天端は静水面と一致しているので $h_1=0$ として算定した。本構造物に作用する水平力は、合田波力式の0.6倍以下となることが分かる。ここで、合田波力式において前面消波ブロック被覆堤に用いる波力の低減係数の考えを応用し、本構造物に対して λ なる波力の低減係数を導入する。

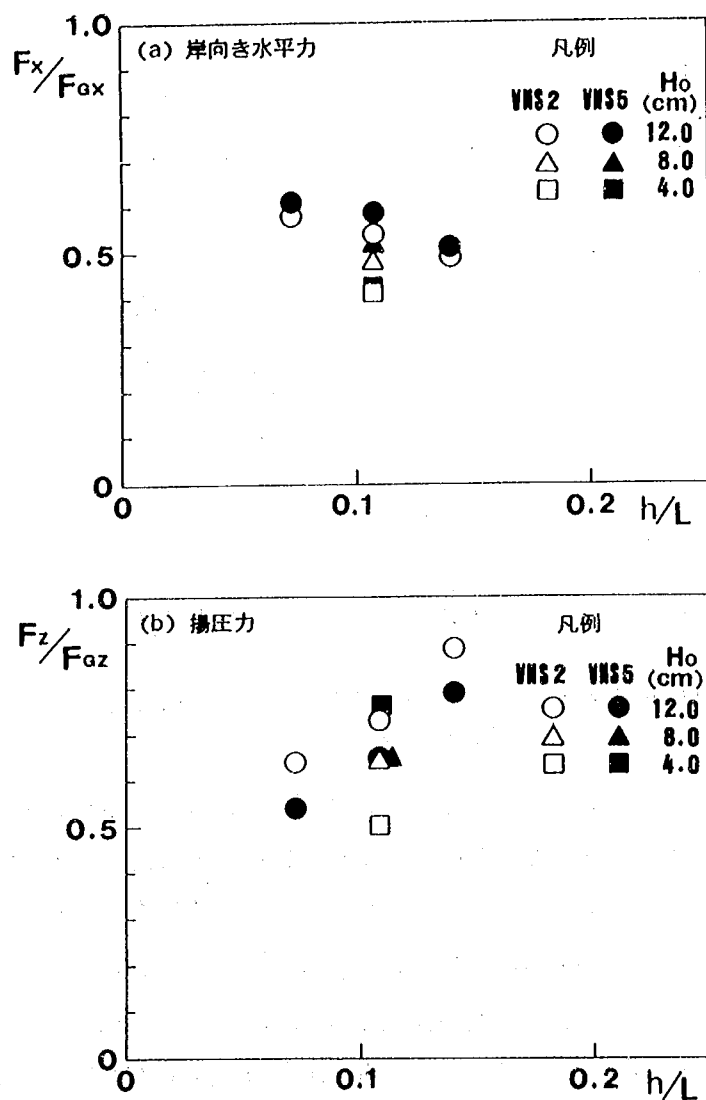


図 7.26 透過水平板付スリット型 (VHS2, VHS5) の F_x/F_{ax} および F_z/F_{az} と h/L の関係

$$\lambda = \lambda_1 (1 - \epsilon) \dots\dots\dots (7.17)$$

λ : 透過水平板式スリット型の波力低減係数

λ_1 : 有効投影面積に対する波力低減係数

ϵ : 鉛直スリット壁の空隙率

λ_0 の値は、スリット堤の形式によって0.6～1.0程度であることが報告されている⁴⁾。また、 λ は、VHSの構造が透過スリット型直立堤であることから波力がスリットの空隙率に比例して減少するものと仮定し上式を示した。

今回の実験結果から上式を適用して λ を算定すると、 ϵ が0.25であるので、 λ_0 に0.8を適用すると λ は0.60となり、合田波力式に対する低減率の上限である0.6とほぼ一致する結果となる。揚圧力については、合田波力式に対して0.5～0.9倍であるが、長周期波の場合、合田波力に対して0.63倍程度となり、水平力の低減係数とほぼ同様の値となる。揚圧力の最大値が発生する位相は、水平力の最大値が発生する位相より進んでおり、両方の力の最大値が同時に作用する可能性は少ないと考えられる。しかし、一般に設計に用いる波は砕波状態であり、今回のような非砕波状態の波と異なって、水平力と揚圧力の最大値が同時に作用することも考えられる。そこで、本構造物に作用する波力は、合田波力式に低減係数 λ (0.6)を乗じ、水平力と揚圧力が同時に作用すると考える。検討結果をまとめると以下のようなものである。

- ① 非砕波の波を本構造物に作用させると、岸向き水平力と揚圧力の最大値は同時には発生せず、揚圧力の方が1/8～1/10周期だけ早く生じる。
- ② 透過水平板に作用する揚圧力は、全揚圧力の約半分である。
- ③ 着底式でも非着底式でも波力特性の著しい違いは認められずほぼ同じである。
- ④ 本構造物に作用する波力は、合田波力式に低減係数 λ を導入することにより算定することができる。

7.4.5 改良空気密閉型*

(1) 波力の作用状況

堤体に作用する水平および鉛直波力 F_x, F_z 、堤体前面および背面の水面変動量 η_1, η_2 の時間波形の一例(AIR 4, $T = 2.8$ sec, $H_0 = 12$ cm)を図7.27に示す。この図から、 F_x の位相は η_1 とほぼ一致しており、堤体前面に部分重複波の峰が現れるときに水平波力が最大になっているのがわかる。また波力の時間波形には、瞬間的(波の周期に比べて短い周期)に変動する成分が現れている。これは、主に堤体前面の水平消波板における流体の乱れに伴って発生する衝撃的な力によるものと考えられる。

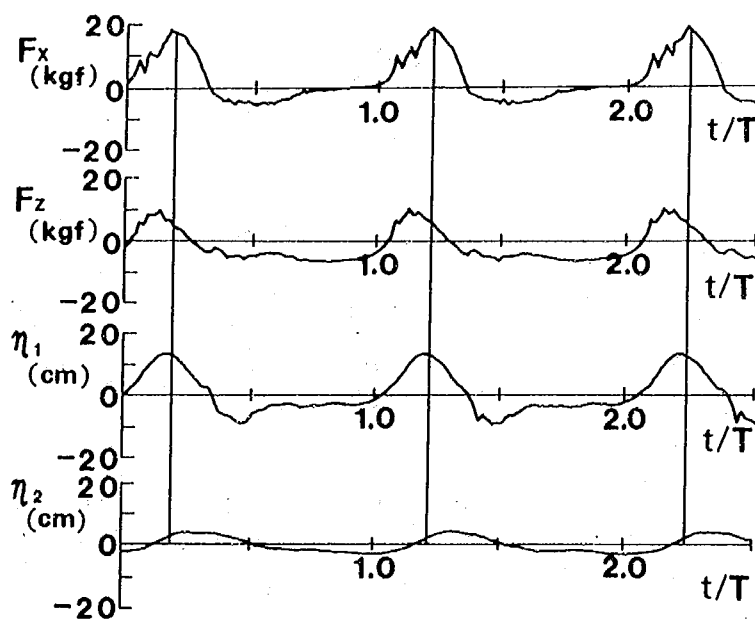


図7.27 改良空気密閉型の波力および水位の時刻歴波形
(AIR 4, $T = 2.8$ sec, $H_0 = 12$ cm)

* 執筆：大山 巧(清水建設株式会社技術研究所)

(2) 波力特性

図 7.28 は, AIR 4 の無次元平均波力強度と B/L の関係を示したものである。水平波力強度については B/L に対して大きな変動はみられないが, 鉛直波力強度については波の周期が最も短い ($B/L = 0.168$) ときが他の場合に比べて大きくなっている。短周期の波ほど消波板での流体の乱れが顕著になることは, 既に前報¹⁾で示したが, $B/L = 0.168$ の場合はこの乱れに伴う衝撃力の影響を強く受けたものと考えられる。

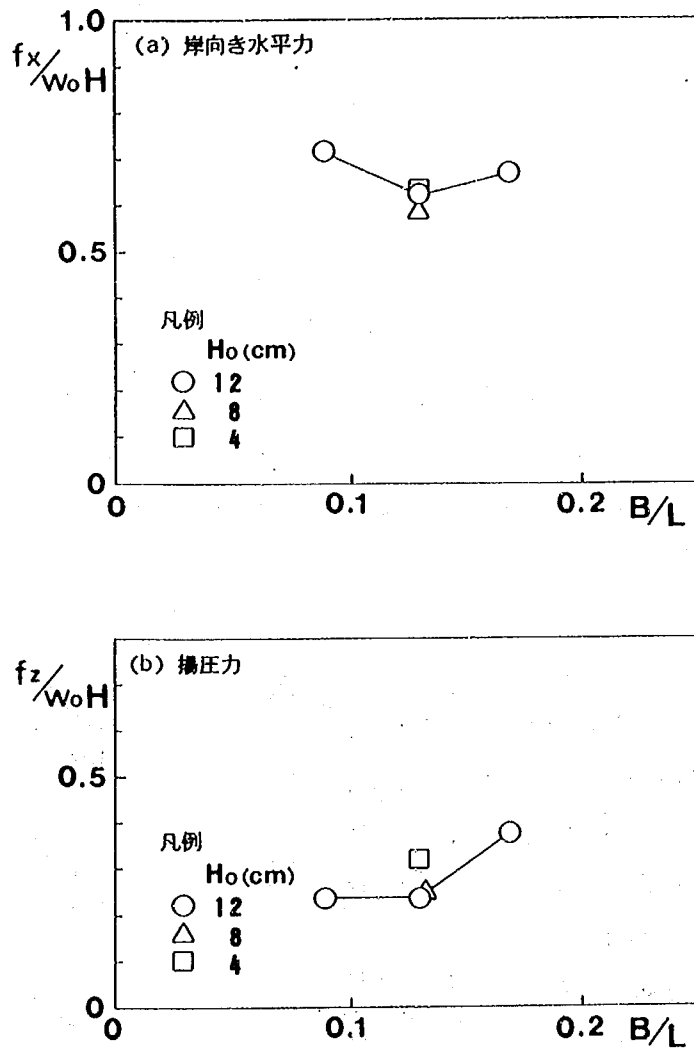


図 7.28 改良空気密閉型 (AIR 4) の f_x/w_0H および f_z/w_0H と B/L の関係

(3) 合田波力との比較

図 7.29 に A I R 4 に作用する全体波力と合田式から求められる波力との比を示す。本構造物は、カーテンウォール下端部と海底面との間に開口部を有しているため、構造物近傍の流体運動は合田式が対象としている不透過防波堤とは異なる。したがって、両者を単純に比較検討することはできないが、図からわかるように、水平波力については合田波力の 7 ～ 9 割程度とすればよいものと考えられる。ただし、鉛直波力については消波板に作用する衝撃的な揚圧力の影響により、 $B/L = 0.168$ で合田波力よりも大きな値になっている。

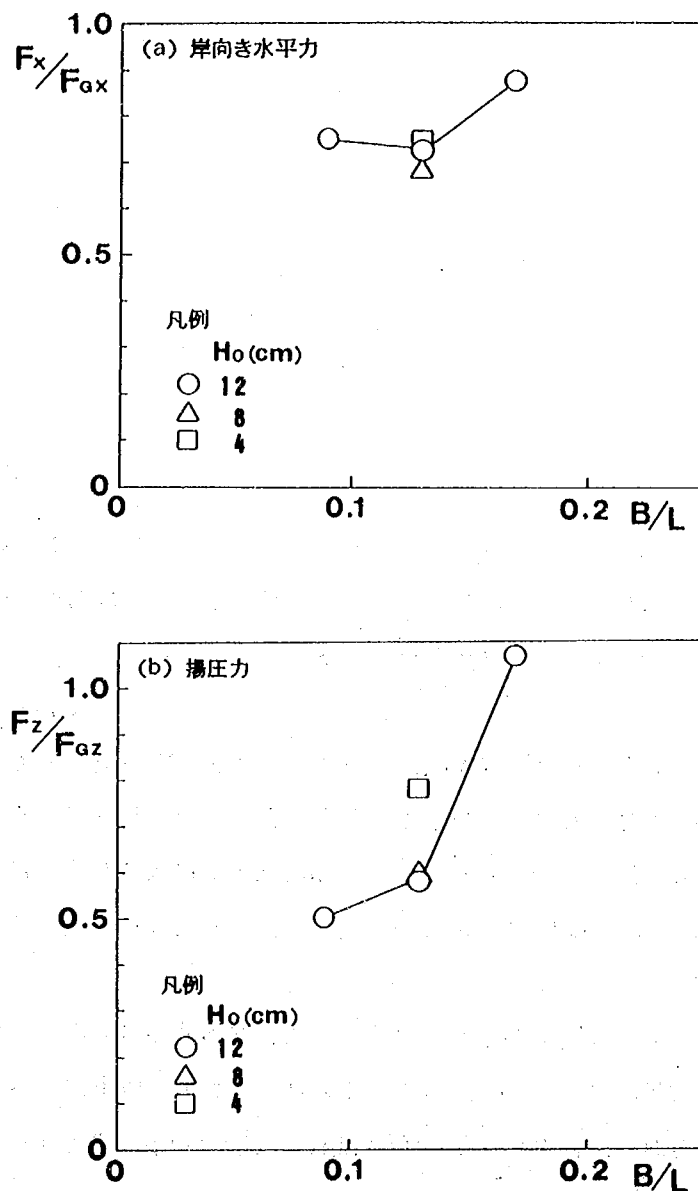


図 7.29 改良空気密閉型 (AIR 4) の F_x / F_{ax} および F_z / F_{az} と B/L の関係

(4) ま と め

- ① 水平波力は、実験を行った範囲 ($0.089 < B/L < 0.168$) で大きな変動はなく、その値は合田式から得られる値の7～9割程度であった。
- ② 最も波の周期が短い $B/L = 0.168$ における鉛直波力は、他の場合に比べて大きくなる。これは前面の消波板に発生する衝撃力によるものと考えられる。

表 7.9 実験結果一覧表

	スリット型	平面トラス型	水平板付スリット型	透過水平板付スリット型	改良空気密閉型
λ	0.64	0.64	0.36	0.60	0.80
λ_1	0.80	0.80	0.60	0.80	0.80
ϵ	0.20 *	0.20	0.40	0.25	0
θ (deg)	21.2	14.3	21.2	27.5	31.5

*スリット型の ϵ は3枚の鉛直スリット壁の空隙率の平均値である。

7.5 ま と め

乱れと反射を利用した5タイプの海域制御構造物の波力について、構造タイプの違いを考慮して相互比較を行う。鉛直スリット壁の空隙率 ϵ は、各タイプによって異なるので、合田波力の低減係数 λ を次のように仮定して、空隙率による低減効果を取り入れてみる。

$$\lambda = \lambda_1 (1 - \epsilon) \quad (7.18)$$

ここに、 λ_1 は有効投影面積に対する波力の低減係数、 ϵ は鉛直スリット壁の空隙率である。

5タイプの海域制御構造物の波力の実験結果をまとめると、表7.9のとおりである。ただし、 θ は鉛直波力の最大値と水平波力の最大値の位相のずれであり、鉛直波力の最大値が水平波力の最大値より先行して現れる場合を正とする。なお、位相のずれは波の周期によって異なり、表7.9に示している値は $T = 2.8 \text{ sec}$ の場合である。

λ_1 の値に着目すると、空隙率による低減効果を取り入れても、なお波力は0.6から0.8倍に低減されることがわかる。また、 ϵ の増加に対して λ_1 は減少しており、 ϵ が0.4以上になると波力の低減効果が大きくなると推察される。これは、各タイプに特有な乱れと反射の効果によるものであると考えられる。

次に、 θ の値に着目すると、どの構造タイプについても鉛直波力の最大値が水平波力の最大値より若干先行して現れる。また、各タイプの考察で述べたように、水平板のない構造物（スリット型、平面トラス型）では鉛直波力強度 $f_z / w_0 H$ が 0.1 以内であるのに対して、水平板のある構造物（水平板付スリット型、透過水平板付スリット型、改良空気密閉型）では $f_z / w_0 H$ が 0.2 より大きくなる。

以上、5 タイプの海域制御構造物の波力実験結果をまとめると次のとおりである。

- ① 各タイプに作用する波力は合田波力に比べて小さい。この場合、合田波力に対する低減係数 λ は 0.36 ~ 0.8 の範囲にあり、各構造タイプによって異なる。
- ② 空隙率による低減効果を考慮しても、なお波力は 0.6 ~ 0.8 倍に低減される。また、このときの λ の値は構造物によって異なる。
- ③ 鉛直波力の最大値は水平波力の最大値より若干先行して発生する。
- ④ 水平板のある構造物では水平板のない構造物より鉛直波力が大きい。

7.6 あとがき

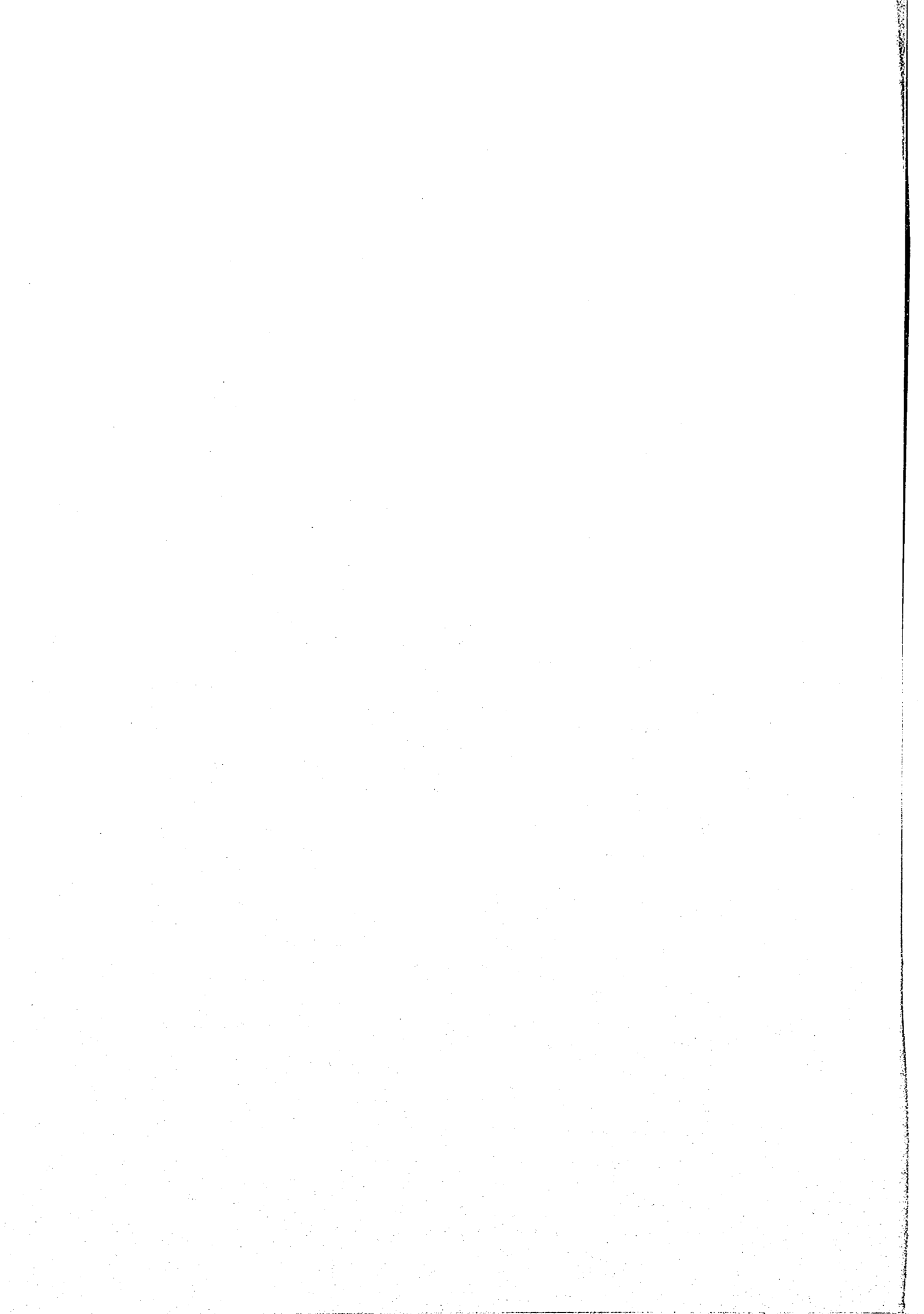
本研究により乱れと反射を利用した消波構造物に作用する全波力の概略の特性が明らかになった。ただし、今回の波力実験での波浪条件は非碎波であり、実験ケースも限られている。今後、構造物の実用化を進めるためには、碎波条件を含めた大波浪時の全波力および部材波力の特性を検討し、耐波設計法を確立する必要がある。

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，173p.，1987.
- 2) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：改訂 海岸保全施設築造基準解説，pp.58 ~ 66.，1987.
- 3) 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(3) — 第一グループ F. S. 調査報告書 —，土木研究所資料，第 2511 号，168p.，1987.
- 4) 谷本勝利ほか：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技研資料，No 246，pp.1 ~ 38.，1976.

第 8 章 水平板付スリット型海域制御 構造物に関する実験的研究

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
三井建設(株)土木本部土木技術部		高木	春生
		吉川	雅人
		田村	直明



8.1 まえがき

本研究は、乱れと反射を利用した消波構造物の一種である水平板付スリット型 (No. 3) の消波効果、および全波力を規則波実験で調べることを目的とする。この水平板付スリット型 (No. 3) は、水平板付スリット型の駿河海岸における F. S. 調査¹⁾の中で、施工の簡略化や急速施工を図るために、従来提案されていた水平板付スリット型 (No. 1, No. 2) とは異なった構造形式として提案されたものである²⁾。なお、本研究は、共同研究第 1 グループによる「乱れと反射を利用した海域制御構造物の開発」に関する共同研究の成果の一部である。

8.2 構造形式概要

この水平板付スリット型構造物は、縦スリットを形成する 2 列の鉛直角柱列体と、水面付近で同一平面を形成し、かつ各々の角柱に独立して取り付けられた水平板とから成る (図 8.1 参照)。構造物の期待する消波機能としては、入射波が角柱列を通過する際や、水平板間の空隙を流体が上昇あるいは下降する際に生ずる乱れによるエネルギー減衰と反射が主である。また、波の条件によっては水平板上での砕波による波浪エネルギーの減衰も期待する。

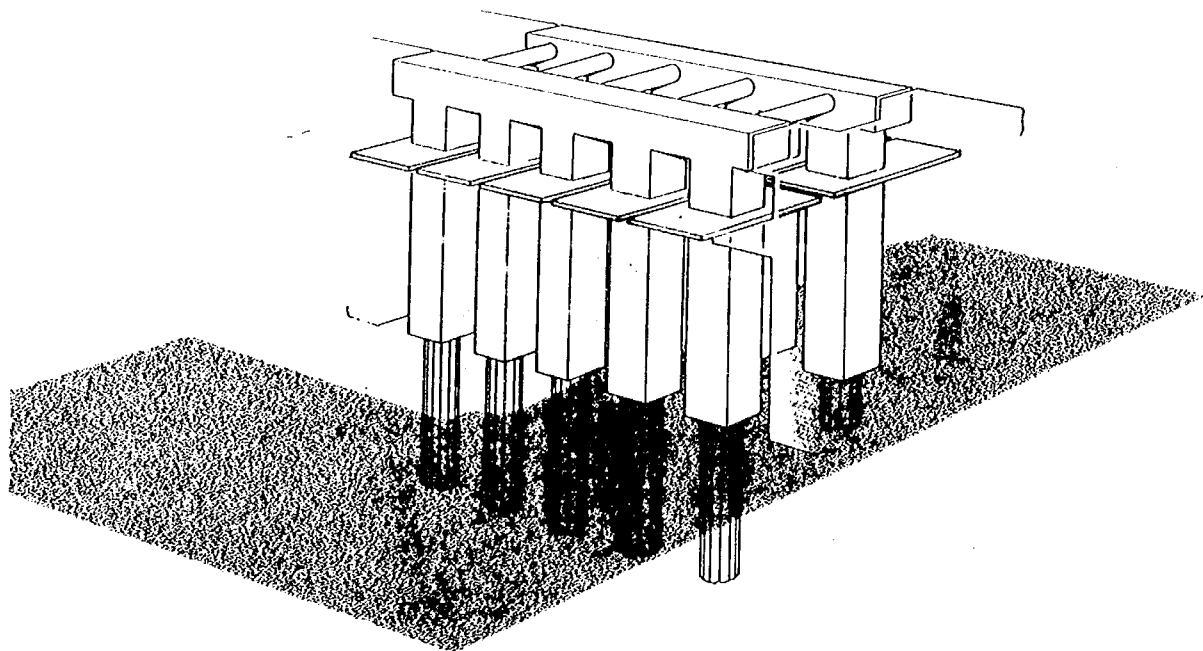


図 8.1 水平板付スリット型構造 (No. 3)

8.3 実験方法

実験は、建設省土木研究所波浪実験棟内の不規則波造波水路を用いて行った。実験方法は前報²⁾と同様である。詳細については前報を参照されたい。実験の縮尺は1/25とし、フルード則に従い模型スケールを定めた。実験波は表8.1に示す11波浪を選定した。また波力実験には、消波性能実験に用いた実験波11波浪中の5波浪 (No 5, 7, 8, 9, 11) を選んだ (表8.1参照)。

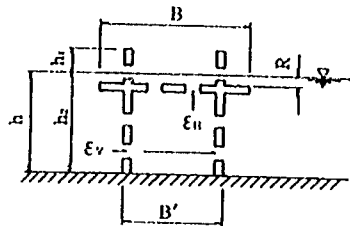
表 8.1 水 理 条 件

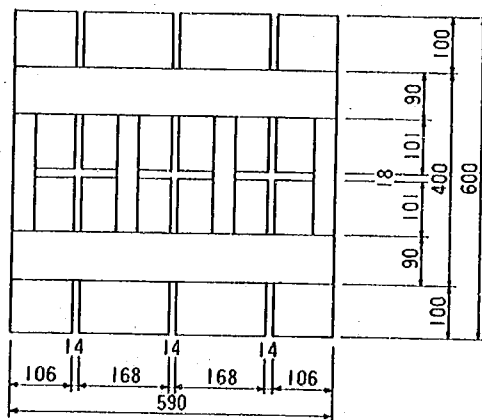
実験波 番 号	周 期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (cm)	沖波波長 L ₀ (cm)	沖波波形 勾 配 H ₀ / L ₀	波 高 H (cm)	波 長 L (cm)	波形勾配 H / L	相対水深 h / L	波力実験
1	1.2	4	225	0.018	3.7	194	0.019	0.206	
2	1.2	8	225	0.036	7.3	194	0.038	0.206	
3	1.4	8	306	0.026	7.3	239	0.031	0.167	
4	1.4	16	306	0.052	14.7	239	0.061	0.167	
5	1.6	12	399	0.030	11.2	283	0.040	0.141	○
6	1.6	16	399	0.040	14.9	283	0.053	0.141	
7	2.0	4	624	0.006	3.9	369	0.011	0.108	○
8	2.0	8	624	0.013	7.9	369	0.021	0.108	○
9	2.0	12	624	0.019	11.8	369	0.032	0.108	○
10	2.8	8	1,223	0.006	8.9	535	0.017	0.075	
11	2.8	12	1,223	0.010	13.3	535	0.025	0.075	○

8.4 構造条件

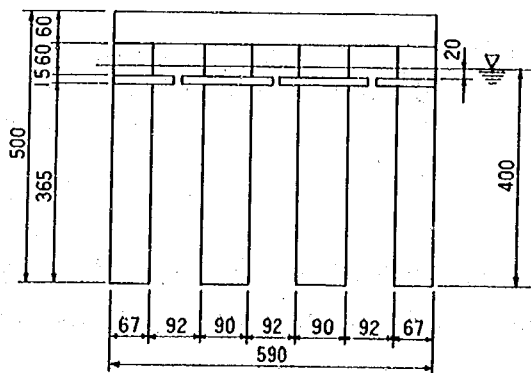
鉛直スリットの空隙率 (ϵ_v) , および水平板の空隙率 (ϵ_H) を変化させ、3種類の構造ケースを設定した (表8.2参照)。模型は水平板部の幅Bが60cm, 角柱列部の幅B'が40cmであり、これらの条件は前回実験した水平板付スリット構造PLS1~4²⁾と同様である。また水平板の設置水深についても、PLS1~4と同様に $R/h = 0.05$ とした。模型の天端高は静水面上10cmとし、吃水は海底面までとした。実験の検討項目は、水平板および鉛直スリットの空隙率を変えた場合の透過率、反射率の変化を調べることである。水平板付スリット型 (No 3)¹⁾ の一例として、PLS6の構造図を図8.2に示す。

表 8.2 構 造 条 件

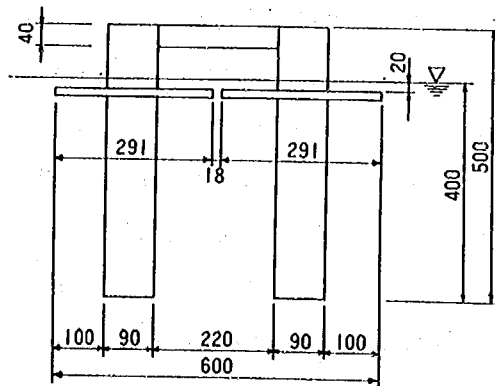
構 造 ケ ー ス	構 造 条 件		実験模型諸量	記 号
	ϵ_v	ϵ_H		
PLS 5	0.3	0.1	$h = 40 \text{ cm}$ $B/h = 1.5$ $B'/h = 1.0$ $h_1/h = 0.25$ $h_2/h = 1.0$ $R/h = 0.05$	
PLS 6	0.4	0.1		
PLS 7	0.05	0.1		



平 面 図(単位:mm)



正 面 図(単位:mm)



側 面 図(単位:mm)

図 8.2 水平板付スリット型模型 (PLS 6)

8.5 測定方法

模型の沖側35m, 岸側10mの場所に各2台の容量式波高計を設置し, 水面波形を測定した。次に合田らの入・反射波の分離推定法³⁾を用いて水深1mでの入射, 反射, 透過波高を求め, 水路の摩擦による波の減衰, および浅水変形を考慮して, 水深40cmにおける入射, 反射, 透過波高: H_I , H_R , H_T を求めた。更に, これらより, 透過率 $K_T = H_T / H_I$, 反射率 $K_R = H_R / H_I$, およびエネルギー損失率 $K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2$ を求めた。波力の測定に関しては, 模型頭部を3分力計に固定し, 水平成分 F_X , 鉛直成分 F_Z , およびY軸回りのモーメント M_Y を測定した。測定の開始は, 安定した設定実験波が模型に到達した直後とし, 約20波記録した。

8.6 透過および反射特性に関する実験結果

入射波長 L に対する水平板の幅 B の比を相対幅 B/L として, PLS6について透過率 K_T , 反射率 K_R と B/L の関係を図8.3に示す。図中の実線は実験値の平均を結んだものである。 K_T は, B/L の増加に伴い減少する。特に $B/L \geq 0.2$ で急激な減少傾向を示す。 K_R は B/L が増加するにつれ透過率とは逆に増加する。ただし増加傾向は緩やかである。この傾向は, 前報²⁾で述べた水平板付スリット型の結果と一致している。

鉛直スリット壁の空隙率が, 透過率, および反射率に与える影響を知るために, 空隙率 ϵ_V を0.3, 0.4と変えたときの K_T, K_R と B/L の関係を図8.4に示す。空隙率 (ϵ_V) を0.4より0.3と小さくすると, K_T は相対割合で5~10%小さくなり, 結果として, 見掛け上 B/L が0.1~0.15と比較的小さいところで大きく低下する傾向を示す。このことから, 鉛直スリット壁で空隙率を変化させることは, K_T の値が大きい波長の長い波に対して効果の大きいことがわかる。

次に, 水平板の空隙率が, 透過率, および反射率に与える影響について検討する。空隙率 ϵ_H を0.1, 0.05と変えたときの K_T, K_R と B/L の関係を 図8.5に示す。水平板の空隙率を $\epsilon_H = 0.05$ と小さくした方が, 全体的に透過率は5%程度小さくなり, 反射率は5%程度大きくなる。両模型の差は B/L

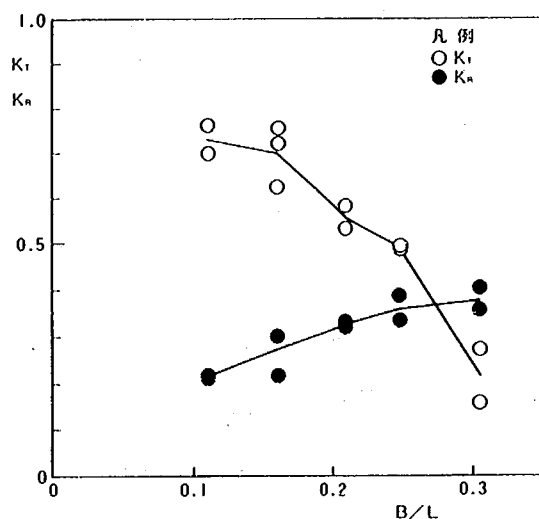


図8.3 K_T, K_R と B/L の関係
($B/h=1.5$, $h_1/h=0.25$, $h_2/h=1.0$,
 $N_V=2$, $N_H=1$, $\epsilon_V=0.4$, $\epsilon_H=0.1$;
PLS6)

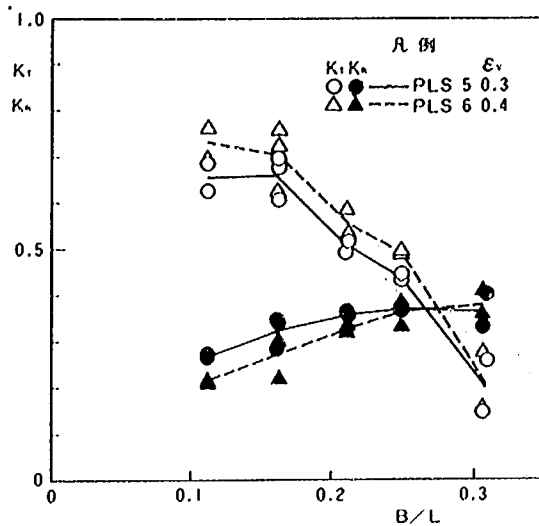


図 8.4 K_T , K_R と B/L の関係
(PLS5, PLS6)

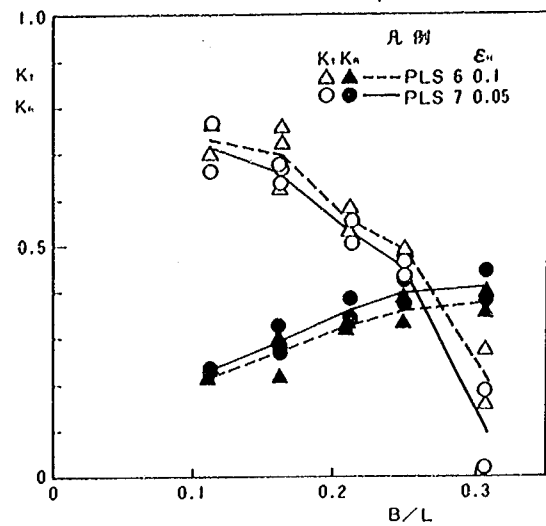


図 8.5 K_T , K_R と B/L の関係
(PLS6, PLS7)

$= 0.3$ 付近の波長の短い波の条件で大きくなる傾向を示す。このことから、水平板は比較的波長の短い波に対して消波効果が大きいと言える。

K_T , K_R と H/L の関係を図 8.6 に示す。 K_T は、いずれの模型についても 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。しかし H/L が約 0.02 と約 0.04 のとき K_T の値が非常に小さくなるケースが認められる。これらはいずれも波長が短く、 $B/L \approx 0.3$ を満足する場合であって、水平板上で砕波が生じたことにより K_T が小さくなったと考えられる。反射率に関しては、 H/L の値にあまり依存せず、 $K_R = 0.2 \sim 0.4$ 程度となっている。この中で PLS 5 のタイプは、 $H/L = 0.03$ 付近の通常波に対し、現在用いられている離岸堤の消波性能 $K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$ をほぼ満足する。

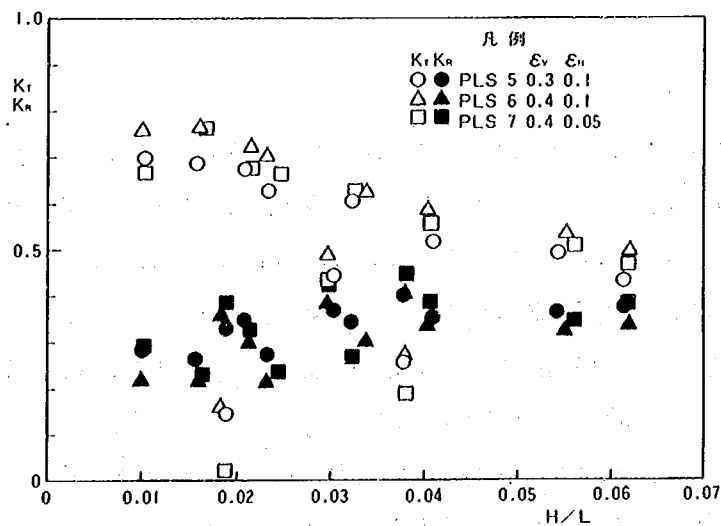


図 8.6 K_T , K_R と H/L の関係
(PLS5, PLS6, PLS7)

最後に、エネルギー損失率 K_L^2 と、 B/L との関係を図 8.7 に示す。 K_L^2 は、全体的に B/L が大きくなると増加する傾向がある。波長の長い波ほど K_L^2 は小さくなるが、すべての範囲で平均 0.4 以上となっている。

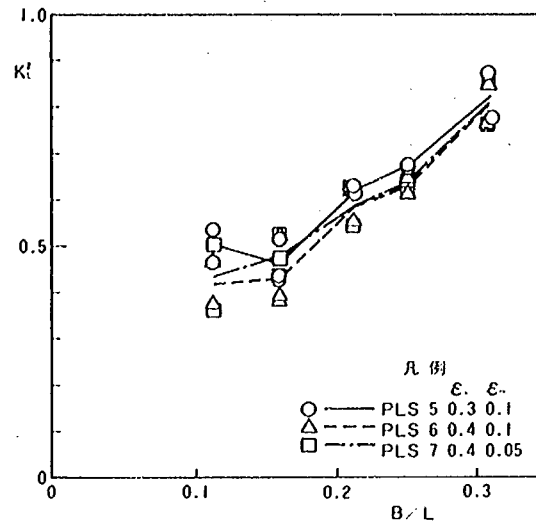


図 8.7 K_L^2 と B/L の関係
(PLS 5, PLS 6, PLS 7)

8.7 波力特性に関する実験結果

波力の計測値は、式 (8.1), (8.2) により単位波力に換算する。

$$f_x = \frac{F_x}{D(h_a + h_2)} \quad (8.1)$$

$$f_z = \frac{F_z}{BD} \quad (8.2)$$

ここに f_x は平均水平波力強度、 f_z は平均鉛直波力強度、 F_x 、 F_z は各々水平、鉛直波力であり、岸向き、鉛直上向きの力を正とする。また、 B は構造物の岸沖方向の幅、 D は構造物の法線方向の長さ、 h_2 は構造物の吃水深、 h_a は波の作用高さ ($0.75 H \leq h_1$ のとき $h_2 = 0.75 H$, $0.75 H > h_1$ のとき $h_a = h_1$, ただし h_1 は静水面から構造物天端までの高さ、 H は入射波高) である。

PLS 6 模型を用い、 $H_0 = 12 \text{ cm}$ 、 $T = 2.8$ 秒の波浪を作用させた場合の模型の前、後面の水位変動 η_1 、 η_2 と F_x 、 F_z の時間波形を図 8.8 に示す。 η_1 、 F_x はほぼ同位相で変動しており、模型前面の水位が最大になったとき、岸向きに最大の水平波力が働く。このとき上向きの鉛直波力が働くが、上向き鉛直波力と岸向き水平波力がそれぞれ最大となる時は一致せず、上向き鉛直波力の方が位相が進んでいる。一方、模型前面の水位が最小になったときは逆の傾向を示す。この傾向は、他の模型においてもほ

ば同様であった。

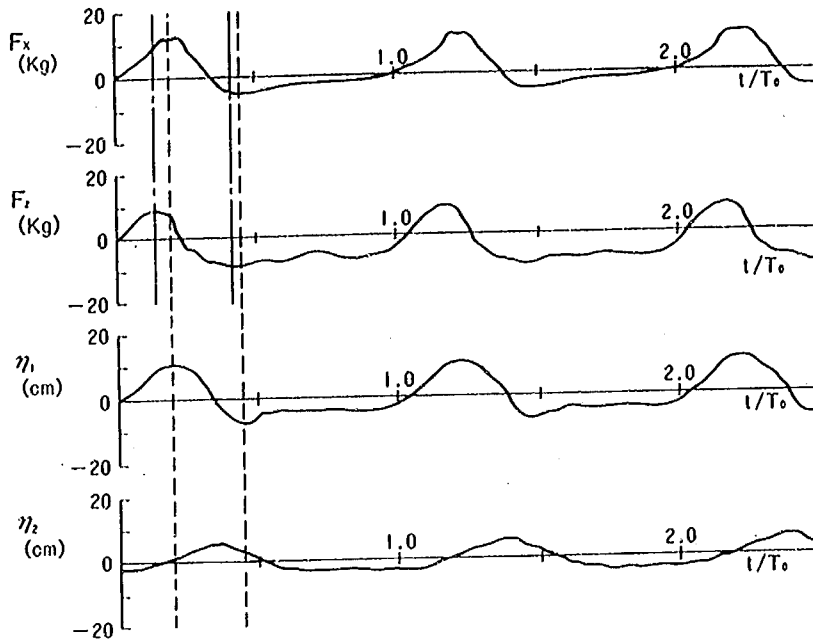


図 8.8 波力および水位の時刻歴波形図
(PLS 6, $T=2.8$ sec, $H_0=12$ cm)

鉛直スリット壁の空隙率 ε_v の波力に対する影響を調べるために、水平無次元波力 $f_x/w_0 H$ と B/L との関係を図 8.9 に示す。 w_0 は海水の単位体積重量、 H は構造物設置水深での入射波高を示す。岸向き無次元波力は、通常の直立堤と同様に B/L が小さくなると増大する傾向がある。また鉛直スリット壁の空隙率 ε_v が 0.3 と 0.4 の場合を比較したとき、 $\varepsilon_v = 0.4$ の方が平均20%程度波力が小さい。また、冲向き無次元波力は、 B/L にあまり依存しない。さらに、空隙率が変わっても、ほとんど差は見られない。

水平板の空隙率 ε_H の波力に対する影響を調べるために、鉛直無次元波力 $f_z/w_0 H$ と B/L との関係を図 8.10 に示す。鉛直無次元波力と B/L との相関は見られず、 B/L が変わってもその値もほぼ同程度であ

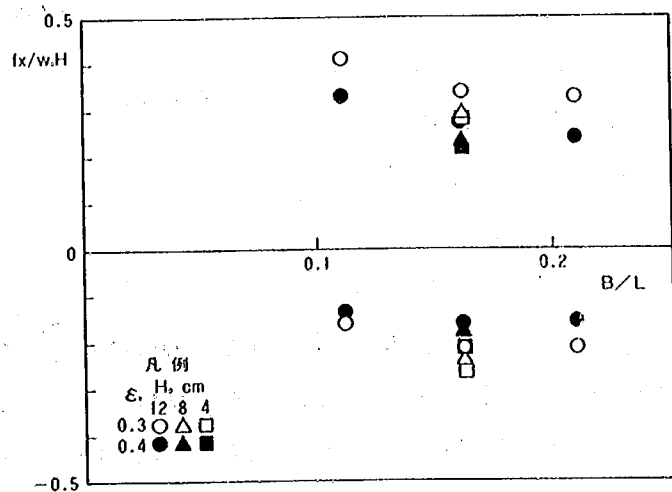


図 8.9 $f_x / w_0 H$ と B/L の関係 (PLS 5, PLS 6)

る。下向き無次元波力は上向き無次元波力に比べて僅かに大きい。上向き、下向き無次元波力の概略の値としては、PLS 6の上向き無次元波力で約0.2, 下向き無次元波力で約0.25, およびPLS 7の上向き無次元波力で約0.25, 下向き無次元波力で約0.3である。水平板の空隙率を0.1より0.05と小さくすると鉛直波力は平均15%程度増加する。

鉛直壁に作用する波力は合田式⁴⁾によって算定できる。しかしここで扱う構造物はスリット式であるから合田式をそのまま用いることはできない。そこで縦軸に水平波力の実験値 F_x と合田式による全水平力 F_{GX} の比を取って B/L との関係調べてみた(図8.11参照)。 F_x / F_{GX} は B/L には関係なくほぼ一定の値を示し、PLS 5の岸向き水平波力で約0.5, 冲向き水平波力で約0.3, およびPLS 6の岸向き水平波力で約0.35, 冲向き水平波力で約0.25となった。

F. S. 調査¹⁾では、水平波力に関する合田波力の低減率を岸向き、冲向きの順に次のように仮定した。

$$\lambda = \lambda_1 (1 - \epsilon) \quad (8.3)$$

$$\lambda' = \lambda_2 (1 - \epsilon) \quad (8.4)$$

ここに、 λ_1, λ_2 は有効投影面積に対する波力の低減率、 ϵ は鉛直スリット壁の空隙率である。ここで式(8.3), (8.4)を用いて λ_1, λ_2 を計算してみる。まずPLS 5の λ は約0.5であり、 ϵ は0.3に等しいことより λ_1 は約0.7となる。また λ' は約0.3であり、 ϵ が0.3に等しいことより λ_2 は約0.4となる。次にPLS 6については、 $\lambda \approx 0.35$, $\epsilon = 0.4$ より λ_1 は約0.6, および $\lambda' \approx 0.25$, $\epsilon = 0.4$ より λ_2 は約0.4となる。共同研究報告書(3)¹⁾で水平板付スリット構造の実験結果から仮定した値 $\lambda_1 =$

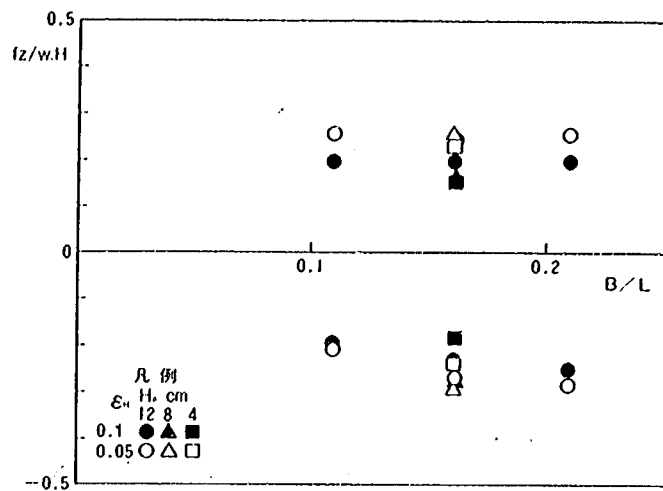


図 8.10 $f_z / w_0 H$ と B/L の関係 (PLS 6, PLS 7)

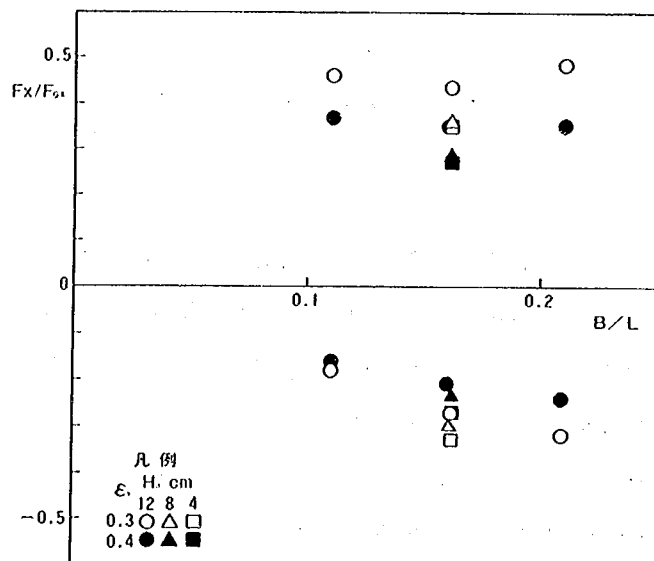


図 8.11 F_x / F_{GX} と B/L の関係 (PLS 5, PLS 6)

0.6, $\lambda_2 = 0.3$ より大きな値となっている。これは、本構造の鉛直スリット壁が従来提案されていたスリット構造とは、異なるためである。

一方、鉛直波力については、合田式による揚圧力との比較は行わなくて良いと考えられる。つまり、本構造物は底版が無く、水面付近に設置された水平板を有する透過堤であるから、底版を有する不透過堤を前提とし、堤体前後の水圧差による揚圧力を考える合田式とは異なるためである。そこで水面付近の水平板に作用する鉛直波力を等分布と仮定して $\alpha w_0 H$ と表すと、最大水平力との組合せを考慮して、図 8.10 より P L S 6 では、上向き波力の場合 $\alpha \approx 0.2$ 、下向き波力の場合 $\alpha \approx 0.25$ となる。共同研究報告書(3)¹⁾では、どちらも $\alpha = 0.2$ と予測していたが、ほぼ予測値と一致している。

8.8 ま と め

水平板付スリット構造 (No. 3) の規則波実験の結果をまとめると以下ようになる。

- ① 角柱列による鉛直スリット壁の空隙率を $\epsilon_v = 0.4$ から $\epsilon_v = 0.3$ に変化させると、透過率は相対割合で 5～10% 小さくなり、反射率は逆の傾向を示す。
- ② 水平板の空隙率を $\epsilon_H = 0.1$ から $\epsilon_H = 0.05$ に変化させると、透過率は 5% 程度小さくなり、反射率は 5% 程度大きくなる。
- ③ エネルギー損失率 K_L^2 は 3 タイプとも B/L の増加にともない緩やかな増加傾向を示し、 $K_L^2 \geq 0.4$ となっている。
- ④ 本構造は、水平板とスリットの水利機能を合わせ持つ。すなわち長周期の波に対しては鉛直スリット壁による乱れと反射が、比較的短周期の波に対しては水平板間の空隙を流体が上昇あるいは下降する際に生ずる乱れと反射が、それぞれ支配的である。
- ⑤ 鉛直スリット壁の空隙率を 0.4 から 0.3 に変えると水平無次元波力が平均 20% 程度増加する。
- ⑥ 水平板の空隙率を 0.1 から 0.05 にすると、鉛直無次元波力が平均 15% 程度増加した。
- ⑦ 岸向き水平波力に関する合田式の低減率 (λ_1) は 従来提案されていた水平板スリット型 (No. 1, No. 2) の場合 ($\lambda_1 = 0.6$) に比べて P L S 6 型ではほぼ同等であったが、P L S 5 型では約 0.1 大きくなった。これは鉛直スリットの空隙率が 0.4 から 0.3 に小さくなったためである。一方、鉛直無次元波力は従来型の鉛直無次元波力とほぼ一致している。

8.9 今後の検討課題

- ① 本構造は、一般の防波堤と異なり透過式の構造である。したがって、設計に際しては設計波作用時の全波力と部材波力を把握するために、大波高、碎波作用時の波力実験を実施する必要がある。

- ② 本構造は、大型四角形構造の柱が海底に着底している形式であるため、海底部での海水の流動によって洗掘が予想される。洗掘に関する十分な検討が必要である。

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 (3) 一第1グループF, S. 調査報告書一, 土木研究所資料, 第2511号, 168p., 1987.
- 2) 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. 47 ~ 88, 1987.
- 3) 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.
- 4) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：改訂海岸保全施設築造基準解説, pp. 58 ~ 66, 昭和62年4月.

第9章 不規則波作用下での水平板付スリット型海域制御構造物の消波効果

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

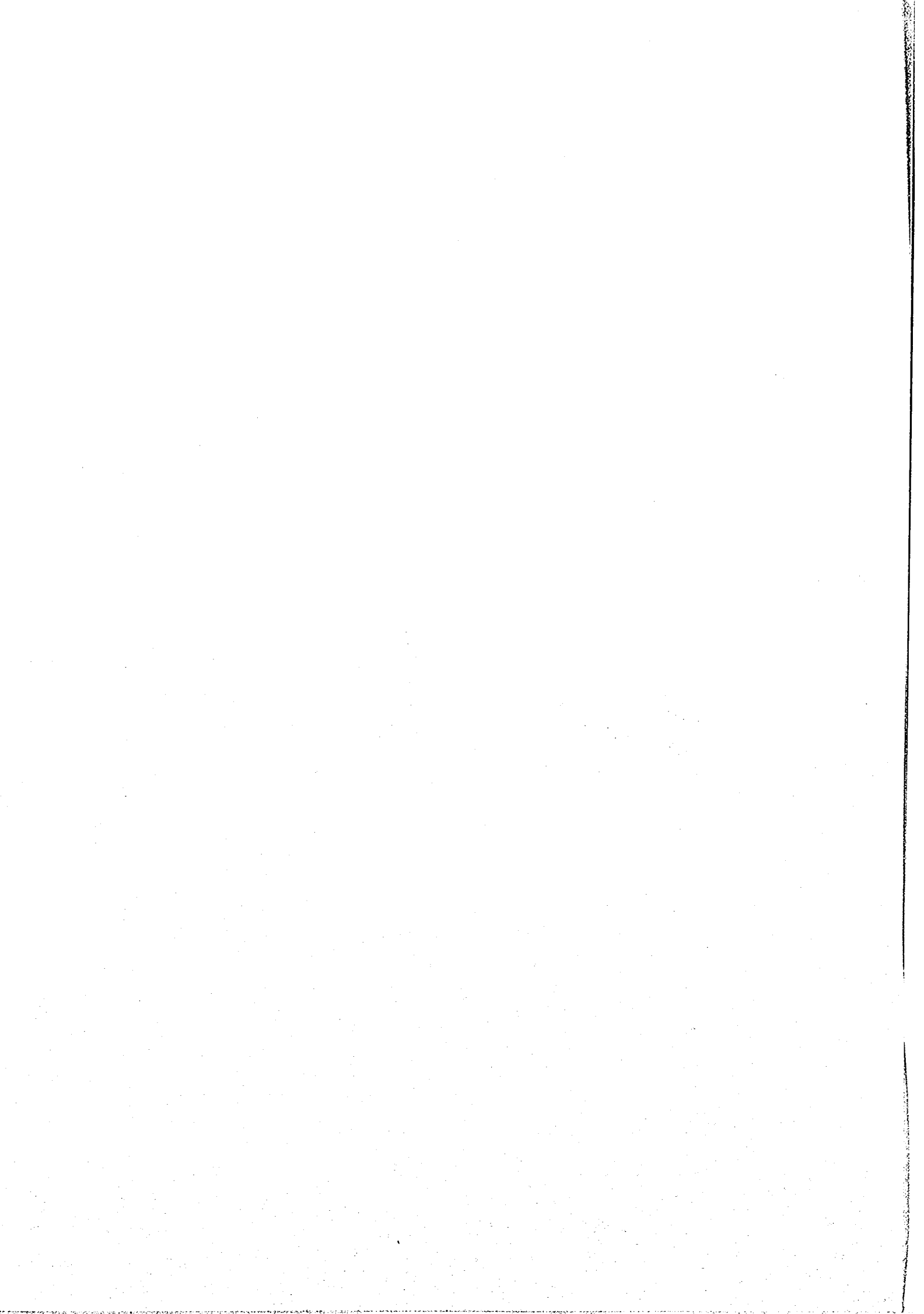
山本 幸次

三井建設(株)土木本部土木技術部

高木 春生

吉川 雅人

田村 直明



9.1 まえがき

乱れと反射を利用した海域制御構造物の一種である水平板付スリット型について、規則波に対する消波特性を前報¹⁾で明らかにした。しかし、実際には海域制御構造物を設置する海域の波浪は種々の波高、周期の波が重なりあった不規則波である。したがって、構造物の消波特性は不規則波の条件下での検討を必要とする。そこで本研究は水平板付スリット型について、不規則波による水理実験を行いその消波特性を明らかにし、規則波に対する消波特性と比較検討した。

なお本研究は、共同研究第1グループによる「乱れと反射を利用した海域制御構造物の開発」に関する共同研究の成果の一部である。

9.2 実験方法

実験は建設省土木研究所の不規則波造波水路を用いて行った。水路は長さ142m、幅0.6m、深さ1.4mで、水路端には油圧式不規則波造波装置が設置してある。水路床は図9.1に示すように造波板から90mの地点まで水平床で、そこから30mを勾配1/50の一樣斜面とし、さらにこれより先10mを水平床とした。また水平床より先6mは勾配1/10の一樣斜面とし、水路端には消波装置を設けた。堤体模型の設置位置は造波板から126mの地点とし、この部分は片面ガラス張りで側面からの観察が可能であった。実験の縮尺は1/25とし、フルードの相似則にしたがい模型と現地を換算している。基本量の縮尺を表9.1に示す。

入射波は模型設置位置でBretschneider・光易型のスペクトル特性を有するものとし、有義波高・有義波周期を変化させ、表9.2に示す4種類の波浪条件を選択した。また、実験に用いた模型は規則波実

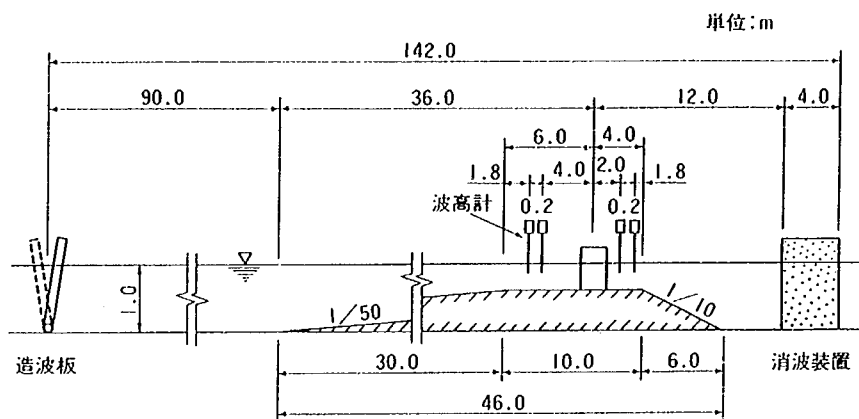


図9.1 実験装置

表9.1 現地と模型の対比

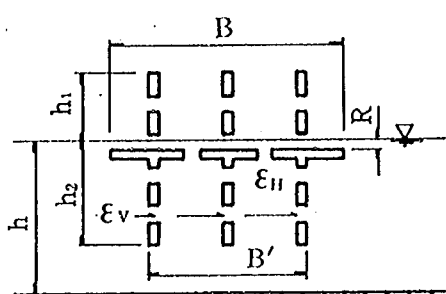
諸元	実物	模型
水深	10 m	40 cm
有義波高	1 m, 2 m	4 cm, 8 cm
有義波周期	6 ~ 10 sec	1.2 ~ 2 sec

表9.2 水理条件

諸元 ケース	$(H_1)^{1/3}$ cm	$(H_1)^{1/3}$ s
1	4	1.2
2	4	1.6
3	8	1.6
4	8	2.0

験¹⁾に用いた模型と同一であり、その諸元を表 9.3 に示す。

表 9.3 構造条件

構 造	構 造 条 件	実験模型諸量	記 号
水 平 板 付 スリット型 構 造 物	スリット枚数 $N = 3$ $\epsilon_V = 0.4$ $\epsilon_H = 0.1$	$h = 40 \text{ cm}$ $B/h = 1.5$ $B'/h = 1.0$ $h_1/h = 0.5$ $h_2/h = 0.7$ $R/h = 0.05$	

9.3 測定および解析方法

波高の測定は模型設置地点より沖側 4 m、岸側 2 m の位置に各 2 台の容量式波高計を 0.2 m 間隔で設置して行った (図 9.1 参照)。測定開始時刻は水路内で安定した多重反射系が形成されるのを待ち、造波開始から 1000 sec 後とした。また測定時間間隔は 0.05 sec、測定データ数は 4100 個とした。なお、測定は各波浪に対して 2 回ずつ行った。

反射率は合田ら²⁾による入・反射波の分離推定法を用いて求めた。同法による入・反射波スペクトルの計算における有効周波数の範囲は、波高計設置間隔を $\Delta\theta$ として次式で与えた。

$$\text{下限 } (f_{\min}) : \Delta\theta / L_{\max} = 0.03 \quad (9.1)$$

$$\text{上限 } (f_{\max}) : \Delta\theta / L_{\min} = 0.45 \quad (9.2)$$

ここに、 $L_{\max}$ および $L_{\min}$ は、有効周波数帯の下限周波数 $f_{\min}$ および上限周波数 $f_{\max}$ にそれぞれ対応する波長である。本実験での波高計設置間隔は 0.2 m であり $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ は、それぞれ 0.30 Hz、1.86 Hz であった。反射率 K_R は、有効周波数帯に含まれる入射波のエネルギー E_I と反射波のエネルギー E_R より次式から求めた。

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad (9.3)$$

また、入射波高 H_I および反射波高 H_R は次式から求めた。

$$H_I = \frac{1}{\sqrt{1 + K_R^2}} H_S \quad (9.4)$$

$$H_R = \frac{K_R}{\sqrt{1 + K_R^2}} H_S \quad (9.5)$$

ここに H_S は入・反射波の合成波の有義波高で、模型沖側で波高計を2台設置した地点での有義波高の平均値である。

透過率 K_T は、波高比およびエネルギー比の平方根として次の2種の式で定義される。

$$K_{TH} = \frac{(H_T)_{1/3}}{(H_I)_{1/3}} \quad (9.6)$$

$$K_{TE} = \sqrt{\frac{E_T}{E_I}} \quad (9.7)$$

ここに、 $(H_I)_{1/3}$ および $(H_T)_{1/3}$ はそれぞれ入射波および透過波の有義波高であり、 E_I および E_T は有効周波数帯に含まれる入射波および透過波のエネルギーである。ただし $(H_T)_{1/3}$ は、模型岸側で波高計を2台設置した地点での有義波高の平均値としている。今回の実験ではすべてのケースについて $K_{TH} \approx K_{TE}$ であったため、以下では透過率 K_T として反射率と同様にエネルギー比の平方根 K_{TE} を用いる。また、エネルギー損失率 K_L^2 は次式により求めた。

$$K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (9.8)$$

次に、各成分波ごとの見かけの透過率 K_T' 、反射率 K_R' を次式で求めた。

$$K_T' (f) = \sqrt{\frac{S_T (f)}{S_I (f)}} \quad (9.9)$$

$$K_R' (f) = \sqrt{\frac{S_R (f)}{S_I (f)}} \quad (9.10)$$

ここに、 $S_I (f)$ 、 $S_T (f)$ および $S_R (f)$ は各成分波ごとの入射、透過、および反射波のスペクトル密度である。 K_T' 、 K_R' は水平板付スリット構造が、不規則波を構成する各々の成分波（周波数 f に対応する規則波）に対して有する特性を表す。

9.4 実験結果と考察

透過率 K_T , 反射率 K_R は有義波の諸元により整理し, 規則波による実験結果¹⁾と比較する。以下, 相対幅 B/L の表示において波長の添字 $1/3$ は省略する。

9.4.1 不規則波実験と規則波実験との K_T , K_R の比較

透過率 K_T , 反射率 K_R と相対幅 B/L の関係を図 9.2 に示す。 K_T は規則波の場合と同様に B/L が大きくなるにつれて減少する。ただし, 規則波でみられた $B/L \geq 0.2$ での急激な減少はみられず, 全体的に緩やかな減少傾向を示す。 K_T の値は $0.4 \sim 0.5$ であり, $B/L \approx 0.20$ では規則波より 0.15 程度小さく, $B/L \approx 0.30$ では逆に規則波より 0.15 程度大きい。このように規則波での K_T の変化に比べて不規則波での K_T の変化が平均化された理由は, 次のように考えられる。第一に, 不規則波は, 有義波相当の周波数を持つ波以外にも種々の周波数の成分波を含んでいる。一方, 水平板付スリット型は規則波実験の結果によると, 低周波数の波は透過率が大きく, 高周波数の波ほど透過率が小さいという消波特性を有している。そのため, 有義波周期が長い場合は, 波に含まれる短周期成分波が効率よく消波され, 有義波相当の規則波に比べて不規則波の K_T が小さくなる。逆に有義波周期が短い場合は, 透過率が大きい長周期成分波の影響で, 規則波に比べて不規則波の K_T は大きな値となる。その結果, 規則波による実験¹⁾で透過率が 0.6 以上であった低周波数成分波の範囲で 0.6 以下となる消波効果が得られた。 K_R は規則波の場合と同じ緩やかな増加傾向を示し, $0.18 < B/L < 0.31$ の範囲内で $K_R = 0.3 \sim 0.4$ と, その値も規則波の場合とほぼ一致する。

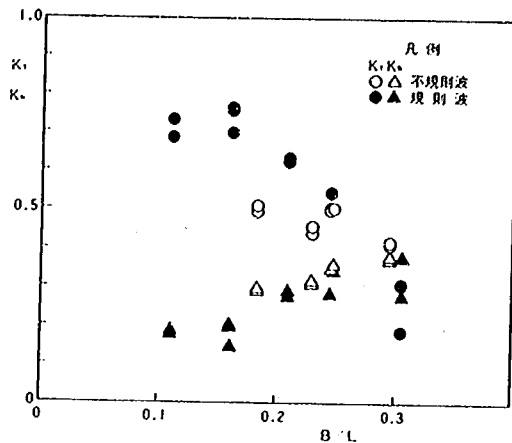


図 9.2 不規則波実験と規則波実験の K_T , K_R と B/L の関係

9.4.2 不規則波実験と規則波実験との K_L^2 の比較

エネルギー損失率 K_L^2 と相対幅 B/L の関係を図 9.3 に示す。不規則波の K_L^2 は B/L の増加に伴いわずかに増加する傾向にある。規則波の K_L^2 と比較すると B/L が小さいほど (周期が長いほど) 不規則波の K_L^2 の方が大きい。

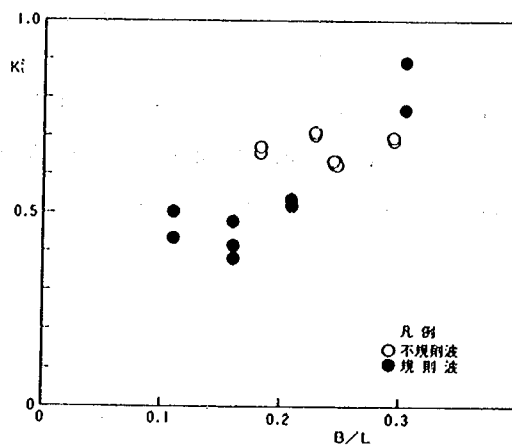


図 9.3 不規則波実験と規則波実験の K_L^2 と B/L の関係

9.4.3 周波数別の消波特性

スペクトル形状の変化に関し、 $H_{1/3} = 6.46 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.24 \text{ sec}$ の場合を例として図9.4に示す。また、図の下部に各成分波に対応する相対幅 B/L の目盛を示す。反射波スペクトルは、入射波のエネルギーレベルをそのまま低下させたものとなっている。透過波スペクトルは、 $0.4 \text{ Hz} \leq f \leq 1.1 \text{ Hz}$ の周波数帯においては、入射波のエネルギーレベルを下げたものとなっている。さらに高周波数帯の $f \geq 1.1 \text{ Hz}$ では透過波のエネルギーレベルが比較的大きくなっている。これは水平板上で起こる砕波、乱れ等の影響で、低周波成分から高周波成分へのエネルギーの移行が生じているためと考えられる。また、入射波のスペクトルピークに比べて、透過波のスペクトルピークは低周波側へ移動している。これは、入射波スペクトルのピークより高周波数側の成分波が低周波数側の成分波より効率よく消波されたからと考えることができる。

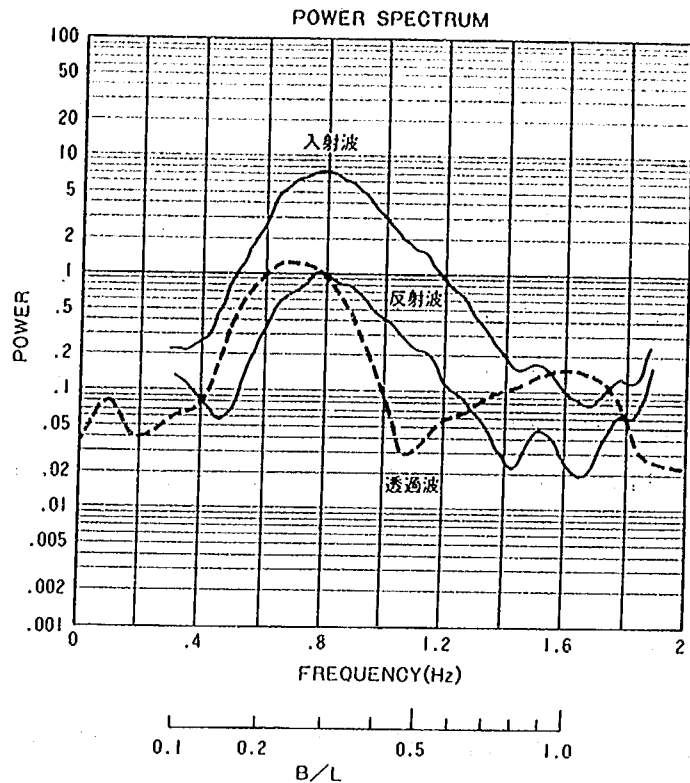


図 9.4 入射、透過、反射波のスペクトル密度
($H_{1/3} = 6.46 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.24 \text{ sec}$)

9.4.4 K_T' 、 K_R' と周波数の関係
見掛けの透過率 K_T' 、反射率 K_R' を図9.5に示す。 K_T' は 0.5 Hz から高周波になるにつれて減少し、 1.1 Hz 付近で極小となり、さらに高周波域では増加している。高周波域での K_T' の増加の理由は、水平板上で起こる砕波、乱れ等によって高周波成分へのエネルギーの移行が起こったためである。 K_R' は周波数が高くなるにしたがい徐々に増加する。これは、規則波実験の結果とよく一致している。

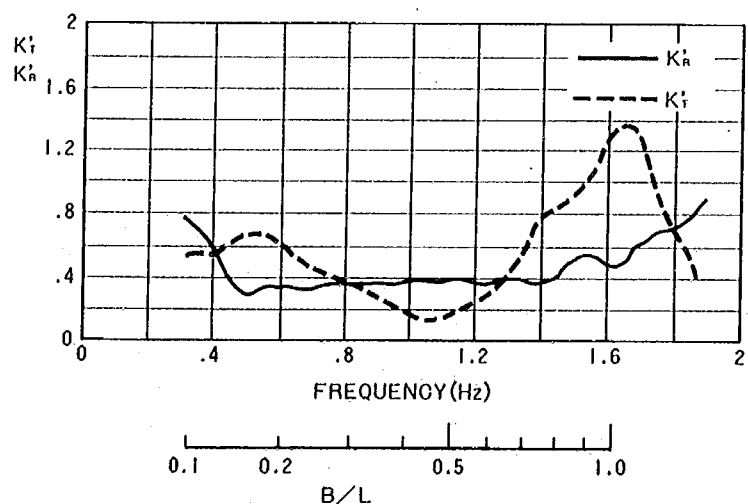


図 9.5 見掛けの透過率 K_T' 、反射率 K_R'
($H_{1/3} = 6.46 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.24 \text{ sec}$)

9.5 ま と め

水平板付スリット構造の不規則波作用下での消波効果に関する特徴をまとめると次のようになる。

- ① 透過率 K_T は相対幅 B/L の増加につれて減少する。ただし、規則波実験で確認された $B/L \geq 0.2$ での急激な減少傾向はみられず、規則波に対する K_T の変化が平均化され、全体的に緩やかな減少傾向を示す。その結果今回の実験の範囲では透過率は最大で $K_T \approx 0.5$ となり現在用いられている離岸堤の透過率の上限値 0.6 を満足する消波効果が得られた。
- ② 反射率 K_R は B/L が増加するにつれて緩やかに増加し、最大で $K_R \approx 0.4$ である。これは規則波の場合とほぼ一致している。
- ③ 不規則波の各周波数成分波ごとの透過・反射特性は、規則波実験の結果とほぼ一致する。

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. 47～88，1987.
- 2) 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10章 斜板消波潜堤の安定性に関する研究

建設省土木研究所海岸研究室	室 長	宇多	高明
建設省土木研究所海岸研究室	研究員	村井	禎美
		山本	幸次
大 成 建 設 (株)	技術本部技術研究所	茗ヶ原	義彦
		勝井	秀博
		小山	文男
		中塚	健司
		清水	正巳
(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
東 急 建 設 (株)	施工本部土木技術部	蛭川	洋二
		藤川	富夫
		渡会	英明

10.1 まえがき

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が種々提案されている。本研究では、それらの一つの型式である斜板消波潜堤の消波機能、安定性、現地への適用性等について検討する。斜板消波潜堤の消波機構は、海面付近に設置した斜板上での砕波によるもので、その消波性能については、既に明らかにした¹⁾。

ここでは、斜板消波潜堤に作用する波力および堤体の滑動実験を行い、斜板消波潜堤の安定性について検討した。

10.2 波力実験

10.2.1 実験方法

実験は、大成建設㈱技術研究所の二次元水路を用いて行った(図10.1参照)。水路は長さ10.0m、幅0.58m、高さ0.5mで、水路端にはフラップ式造波装置が設置してある。また、模型堤体背後の水路端には消波装置を設置した。水路には高さ20cm

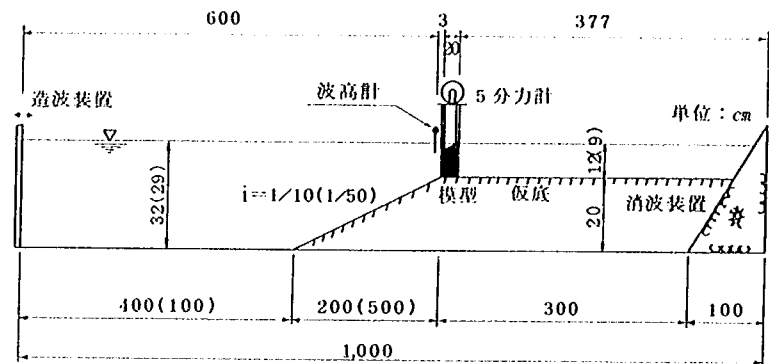


図 10.1 実験装置

の水平床を設置し、造波装置側には勾配が1/50の場合と1/10の場合の2ケースの斜面を設置した。模型堤体は、造波板までの距離が6.0mの斜面法肩に設置した。波力測定装置の能力を考慮し、水路は仕切りを設け、幅20cmとして用いた。入射波の検定は、堤体設置位置の通過波高を正確に知るために容量式波高計を用いて堤体を設置しない状態で行った。堤体に作用する全体波力は、水平力、鉛直力、モーメントが測定可能な5分力計を用いて測定した。

合田は、波力に関する実験縮尺は1/10～1/50程度が望ましいとしている²⁾。本実験の縮尺は1/100であり実験値については縮尺の影響を無視できない。しかし、本実験の目的は、堤体設置地点の水深および海底勾配の違いが波力にもたらす影響を比較検討することにあるため、縮尺1/100程度の小型実験でもこれらの評価が可能であると判断した。模型の諸元を表10.1に示す。堤体幅、斜板勾配、前面壁および斜板開口率、突起などの諸元は、前報¹⁾の消波実験の結果より、現地波浪で周期14sec以下の波に対して、透過率 $K_T \leq 0.6$ 、反射率 $K_R \leq 0.5$ となるように設定した。

実験ケースを表10.2に示す。斜板消波潜堤と比較を行うために直立防波堤を用いた実験も行った。海底勾配 i は緩勾配 (1/50) と急勾配 (1/10) の2種類である。周期 T は0.6, 0.8, 1.0, 1.2secの4種類とし、波高 H は砕波前のものから砕波後の波まで広範囲に選定した。実験に用いた波高は2.0,

表 10.1 構造条件

諸 元		実 験	現 地	記 号
堤 体 幅 B		20 cm	20 m	
前面天端高 h_1		7.5 cm	7.5 m	
後面天端高 h_2		9.5 cm	9.5 m	
突起	S_1	1.125 cm	1.125 m	
	S_2	1.125 cm	1.125 m	
斜 板 勾 配 i_s		1/10	1/10	
前面開口率 ϵ_1		9.1%	9.1%	
斜板開口率 ϵ_2		10.3%	10.3%	
水 深 h		9.12 cm	9.12 m	
没 水 深 R		-0.5, 2.5 cm	-0.5, 2.5 m	

表 10.2 実験ケース

構造モデル	海底勾配 i	水 深 h (cm)	周 期 T (sec)	波 高 H (cm)
斜板消波潜堤	1/50	12	0.6	2.0
			0.8	4.0
			1.0	6.0
			1.2	13.0
直 立 堤	1/10	9		

4.0 cm および最高波高の3種類とした。 $H = 2.0, 4.0$ cm は砕波前の波であり、最高波高は砕波後の波である。堤体設置地点の波高検定結果を $i = 1/50, 1/10$ の場合について示す (図 10.2, 10.3 参照)。各図において横軸には造波板のストローク e (mm) をとった。

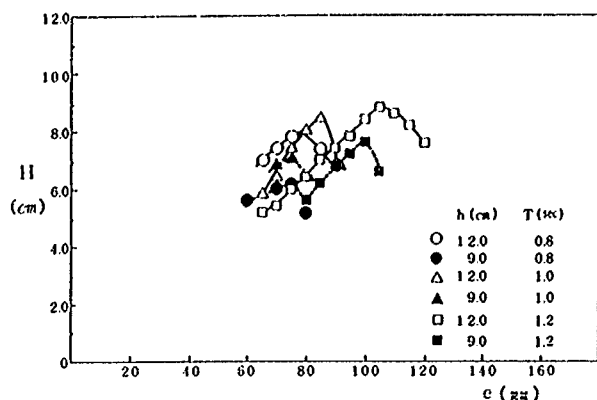


図 10.2 波高検定曲線 ($i = 1/50$)

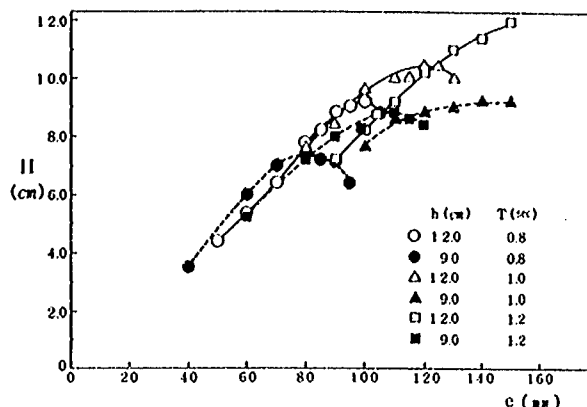


図 10.3 波高検定曲線 ($i = 1/10$)

10.2.2 実験結果

(1) 波力の作用状況

斜板消波潜堤に作用する波力は、海底勾配、水深、波の条件によって異なる。図 10.4 ~ 10.7 は堤体から 3 cm 前方における水面波形 η_1 と堤体に作用する水平力 F_x 、鉛直力 F_z の測定記録の例を示したものである。 F_x は波の進行方向を正、 F_z は上向きを正としている。図 10.4 は $h = 9$ cm, $T = 1.2$ sec, $H = 4.0$ cm, $i = 1/50$ の条件の場合である。波は堤体前方では砕波せず、斜板上で砕波する。 F_x , F_z はほぼ滑かな波形を示しており、斜板上での砕波の影響による波形の乱れがわずかにみられる程度である。堤体前面の波高が最大になる時、鉛直上向きの力が最大になり、 F_x は最大値の80%程度を示している。一方、 F_x が最大になる時 F_z はほぼ0となる。ただし、設計上は F_x と F_z の合力が大きくなる F_z 最大時について堤体の安定計算を行う必要があると

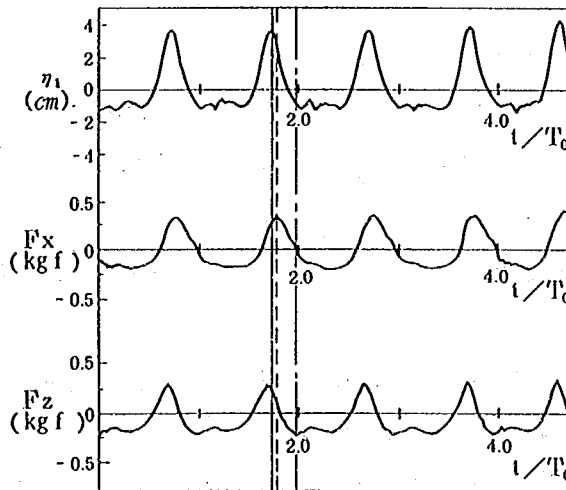


図 10.4 水面波形 η_1 、水平力 F_x 、鉛直力 F_z の測定例 (斜板消波潜堤, $h = 9$ cm, $T = 1.2$ S, $H = 4.0$ cm, $i = 1/50$)

考えられる。また、鉛直下向きの力が最大となる時 F_x はほぼ0となる。図 10.5 の $h = 9$ cm, $T = 1.2$ sec, $H = 7.6$ cm, $i = 1/50$ の場合は、波が堤体前方約 25 cm で砕波する条件である。波は堤体前方で砕けて堤体に作用し、斜板上で再び砕波する。斜板上での砕波の影響により F_x , F_z の波形に微小変動がみ

られるが、衝撃的な波力は認められない。 F_x の微小変動は粗度、開口部に水塊が衝突することにより生じたものであるが、微小変動の5波目以降は F_z にも微小変動が現われているため模型の自由振動であると思われる。図10.4と同様に堤前波高が最大となる時 F_z は最大となり、 F_x が最大となる時 F_z はほぼ0となる。この場合も、 F_x と F_z の合力が大きくなる F_z 最大時について堤体の安定計算を行う必要があると考えられる。図10.4と異なる点は、鉛直下向きの力が最大となる時 F_x に最大値の50%程度が作用していることである。

図10.6は $h = 9\text{ cm}$, $T = 1.2\text{ sec}$, $H = 9.2\text{ cm}$, $i = 1/10$ の場合で、衝撃的な波力が堤体に作用しているのがわかる。波は海底勾配の影響により堤体前面で巻き波となり、波面が堤体の鉛直壁に衝突する。この瞬間 F_x , F_z の最初のピークが現われ、 F_z は最大となる。次に発生する F_x のピークは、同時に行っているビデオ撮影の観察によると、水塊が堤体中央部にある突起に衝突する時に生ずるものである。鉛直下向きの力が最大となるのは波峰部分の大量の水塊が斜板に衝突する時に発生し、 F_x も最大となる。これ以降の振動は振幅が徐々に減衰していることを考慮すると模型の自由振動によるものと思われる。図10.5, 10.6より、 $i = 1/50$ では衝撃砕波力は作用せず、一方、 $i = 1/10$ では衝撃砕波力が作用することがわかる。光易の実験によれば、 $i = 1/30$ よりも急な海底勾配の時に衝撃砕波力が発生することが認められていることから、 $i = 1/30$ よりも急な海底勾配のときは衝撃砕波力を考慮した設計が必要である。

また、 F_x , F_z を比較すれば明らかなように、堤体の安定計算に用いる水平力、鉛直力については位相および力の作用方向を考慮する必要がある。堤体の安定上最も注目しなければならないのは、鉛直上向き、下向きの力が最大となる場合である。 F_z が最大値をとる時は堤体に最大の揚圧力が作用している時であり、この時多少の変動はあるものの F_x も最大に近い。このため、堤体の滑動に対する安全性は最も低くなる。ま

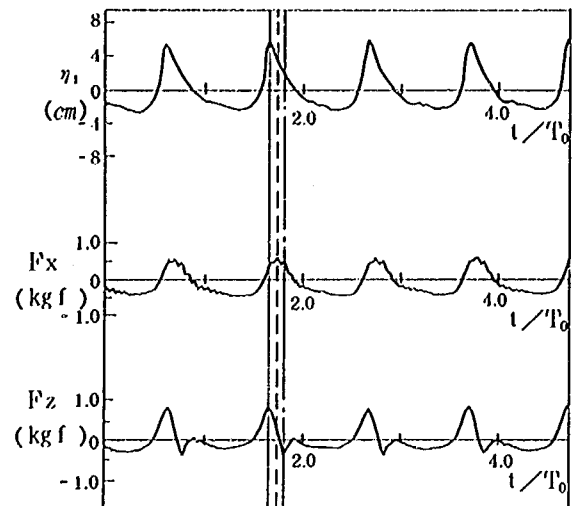


図10.5 水面波形 η_1 , 水平力 F_x , 鉛直力 F_z の測定例 (斜板消波潜堤, $h = 9\text{ cm}$, $T = 1.2\text{ S}$, $H = 7.6\text{ cm}$, $i = 1/50$)

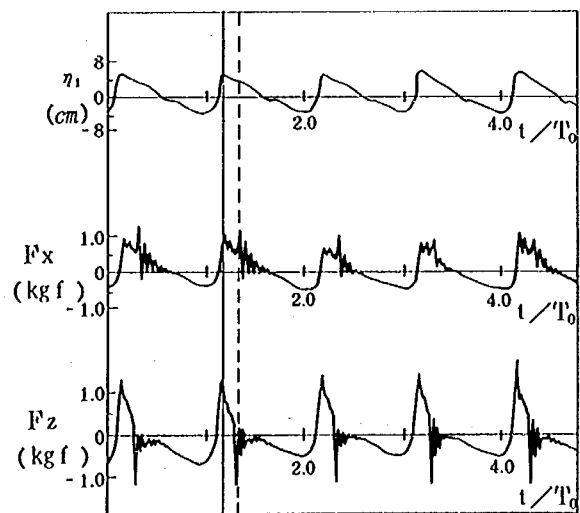


図10.6 水面波形 η_1 , 水平力 F_x , 鉛直力 F_z の測定例 (斜板消波潜堤, $h = 9\text{ cm}$, $T = 1.2\text{ S}$, $H = 9.2\text{ cm}$, $i = 1/10$)

た、鉛直下向きの力の最大値が作用する場合、 F_x は最大を示している。このため、堤体の端趾圧が最大となり、地盤の支持力に対する安全性がもっとも低くなる。

図 10.7 は $h = 9\text{ cm}$, $T = 1.2\text{ sec}$, $H = 4\text{ cm}$, $i = 1/50$ の条件の下で直立防波堤に作用する波力と水面波形の測定例を示したものである。同様の条件下における斜板消波潜堤の場合（図 10.4 参照）と比較して、 F_x , F_z は 2 倍程度大きくなっている。このことより、潜堤では直立防波堤に比べて、水平力が低減されることがわかる。

(2) 作用波力に対する堤体設置位置の影響

海底斜面に続く水平床上に直立防波堤を設置する場合、波の砕波位置から堤体の設置までの距離の違

いにより作用波力が大きく変化することが高橋⁴⁾らにより実験的に確認されている。しかし、本構造は潜堤であるため波が越波し衝撃砕波力を受けにくいことが予想される。したがって、この距離の違いによる作用波力の変化を調べるために、海底斜面の法肩からの設置位置 L_B を 0, 25, 50 cm に変化させ作用波力を調べた。図 10.8, 10.9 は $h = 9\text{ cm}$, $i = 1/10$ の場合に L_B が F_x , F_z に及ぼす影響を示したものである。 F_x , F_z は $L_B = 0$ で最大となる。また、周期 T が長くなると L_B の違いによる F_x , F_z のそれぞれの差は大きくなる。周期の短い $T = 0.8\text{ sec}$ の場合では F_x , F_z の値はほぼ同程度の値となる。また、 F_x と F_z を比較すると、 F_z の方が L_B の影響を大きく受ける。

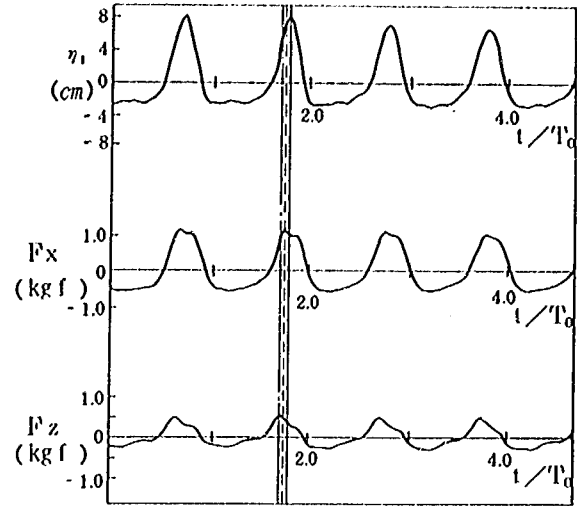


図 10.7 水面波形 η_1 , 水平力 F_x , 鉛直力 F_z の測定例（直立防波堤, $h = 9\text{ cm}$, $T = 1.2\text{ S}$, $H = 4\text{ cm}$, $i = 1/50$ ）

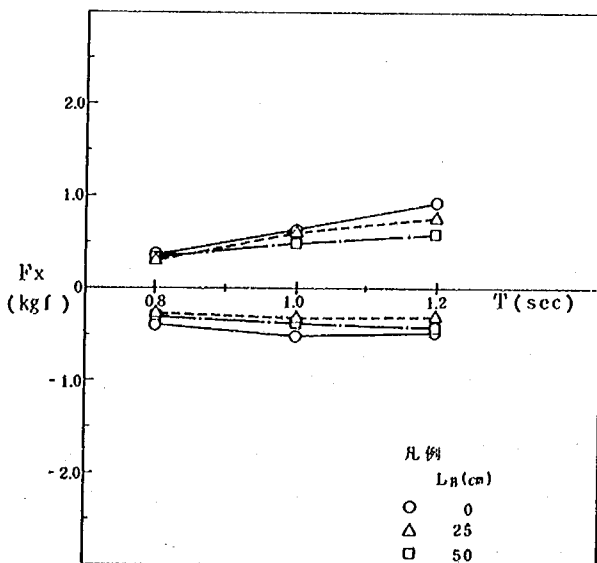


図 10.8 海底斜面の法肩より堤体の設置位置までの距離 L_B が水平力 F_x に及ぼす影響 ($h = 9\text{ cm}$, $i = 1/10$, 砕波)

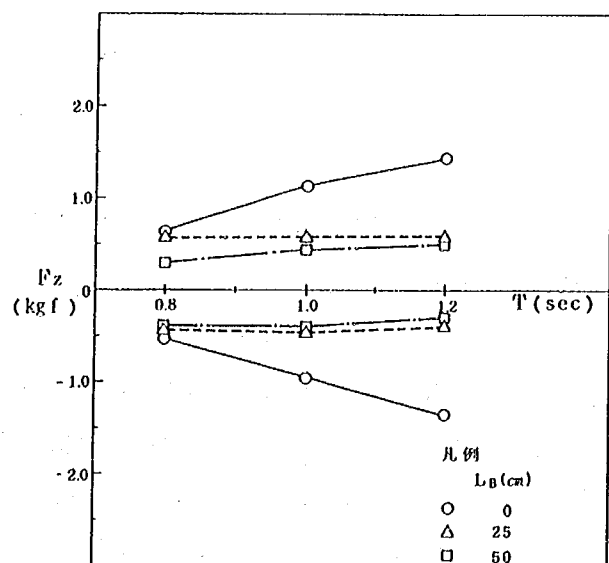


図 10.9 海底斜面の法肩より堤体の設置位置までの距離 L_B が鉛直力 F_z に及ぼす影響 ($h = 9\text{ cm}$, $i = 1/10$, 砕波)

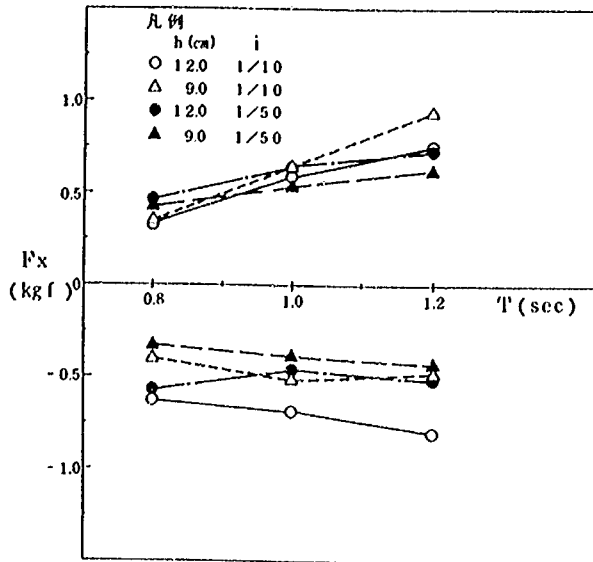


図 10.10 水深 h および海底勾配 i が水平力 F_x に及ぼす影響 ($L_B=0$, 砕波)

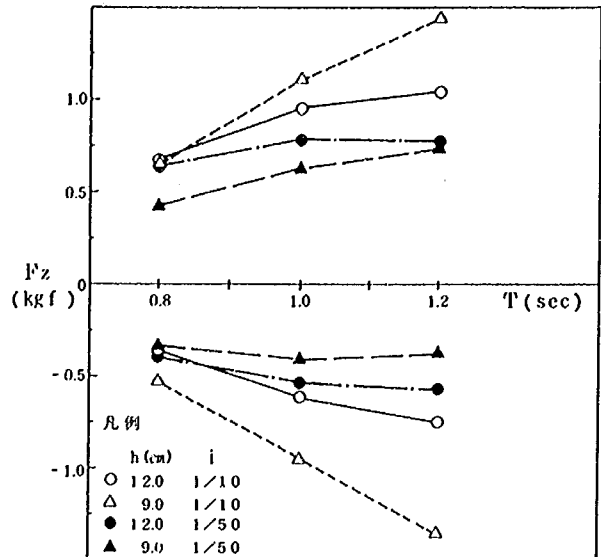


図 10.11 水深 h および海底勾配 i が鉛直力 F_z に及ぼす影響 ($L_B=0$, 砕波)

(3) 水深および海底勾配の影響

図 10.10, 10.11 は $L_B=0$ の場合に h および i が F_x , F_z に及ぼす影響を示したものである。 T が長くなると F_x , F_z は増加する。その増加の度合は F_x については h , i の影響を大きく受けないが、 F_z についてはそれらの影響が大きい。また、パラメータ h , i の違いが F_x に及ぼす影響はやや複雑であるが、 F_z ではその影響は明確でかつ系統的である。すなわち、同一水深の条件では、海底勾配が急なほど F_z は大きい。また、 $i=1/10$ の場合、 $h=9\text{ cm}$ の方が $h=12\text{ cm}$ よりも F_z は大きい。しかし、 $i=1/50$ の場合には逆の傾向となっている。しかしながら、今回は実験データに限りがあるためにこの理由についての十分な検討はできなかった。この点に関しては、今後、縮尺 $1/25$ の波力実験を行い解明する予定である。潮位差が大きく、かつ海底勾配が急な海底に斜板消波潜堤を設置する場合、設計波の周期が長くなると H. W. L. 時と L. W. L. 時の水深の違いにより鉛直力が大きく変化する。鉛直力が大きく変化する条件は、現地波浪で $T \geq 10\text{ sec}$, $i=1/10$, 潮位差 $\Delta h=3.0\text{ m}$ である。 $\Delta h < 3.0\text{ m}$ の場合の作用波力については、今後実験を行い検討する必要がある。

(4) 斜板消波潜堤と直立防波堤の作用波力の比較

斜板消波潜堤と直立防波堤の正の水平力、鉛直力の比をそれぞれ α_x , α_z とする。図 10.12, 10.13 は α_x , α_z と周期 T の関係を h , i をパラメータとして示したものである。ここで、 α_x , $\alpha_z < 1$ の場合は、斜板消波潜堤に作用する波力の方が小さいことを示している。 $0.8\text{ sec} \leq T \leq 1.2\text{ sec}$ で α_x は $0.2 \sim 0.65$ の範囲に分布しており、直立防波堤に比べて水平力が大きく低減していることがわかる。また、非砕波時よりも砕波時の方が α_x は小さい。同様に $i=1/50$ よりも $i=1/10$ の方が α_x は小さくなる。水深については $h=9\text{ cm}$ よりも $h=12\text{ cm}$ の方が α_x は小さくなる。結局、本構造は没水型であるために、砕波した波は越波し、海底勾配が急になるほど、水深が大きくなるほど直立防波堤よりも波峰部分の衝撃砕波力を受けにくいことを示している。一方、 α_z は $0.8\text{ sec} \leq T \leq 1.2\text{ sec}$ で $0.5 \sim 1.35$

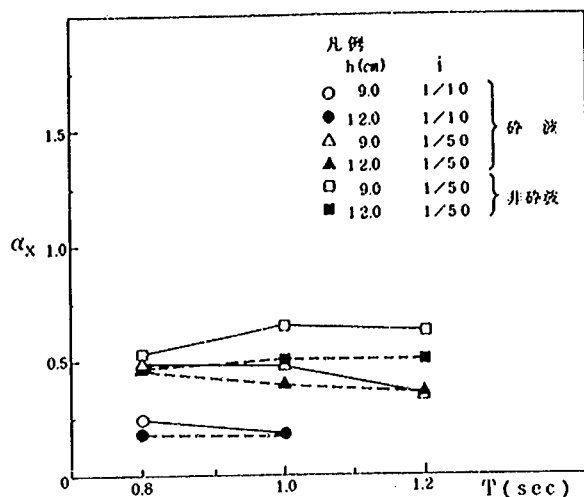


図 10.12 斜板消波潜堤と直立防波堤の水
平力の比 α_x と周期 T の関係

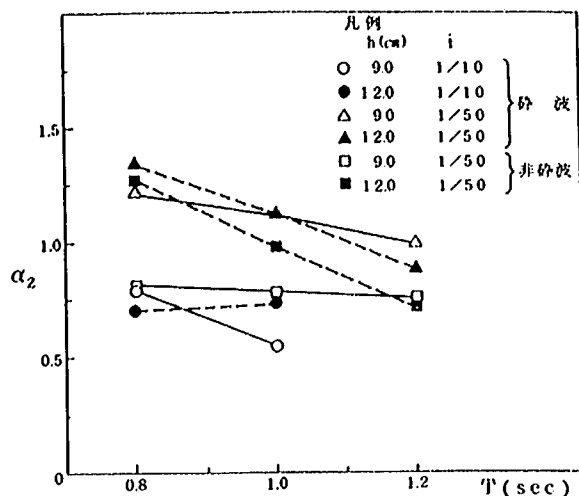


図 10.13 斜板消波潜堤と直立防波堤の鉛
直力の比 α_z と周期 T の関係

の範囲に分布しており、直立防波堤に比べて揚圧力が大きくなる場合があることを示している。直立防波堤の場合、堤前面には重複波が形成され、前面の水位変動は大きい、堤背後では水位変動がないため底板に作用する揚圧力は三角形分布となる。斜板消波潜堤の場合、堤前面の水位変動は直立防波堤に比較して小さく、また、波が透過するため底板に作用する揚圧力は三角形分布とならず台形分布となる。このため、揚圧力が直立防波堤よりも大きくなる場合があるものと思われる。したがって、潜堤の揚圧力を評価する場合、揚圧力分布の形状を考慮する必要がある。ただし、斜板消波潜堤は斜板にも揚圧力が作用するため、今回の実験のように合波力を求める実験では斜板と底板に作用する揚圧力の関係を調べるができなかった。これについては、今後、各部材に作用する波圧分布を調べることにより解明する必要がある。

10.3 滑動実験

10.3.1 実験方法

実験は、大成建設技術研究所の二次元造波水路を用いて行った（図 10.14 参照）。水路は全長 47 m、幅 0.8 m、高さ 1.6 m で、水路端にはフラップ式造波装置が設置してある。また、模型堤体背後の水路端には消波装置を設置した。水路内に高さ 40 cm の水平床を設置し、造波装置側を 1/10 勾配の一樣斜面とした。水平床上には斜面法肩から消波装置側へ 2 m の範囲に 10 cm の層厚で碎石を敷いた。使用した碎石は粒径が 15~18 mm、中央粒径が 17 mm の比較的角が丸いものである。この碎石上に堤体を設置し、堤体の滑動量をビデオトラッカーを用いて測定した。ビデオトラッカーは構造物上に貼られた標的をカメラを通して認識し、構造物の時々刻々の運動を追跡することができる。実験では、堤体側面の上下 2 箇所の一辺の長さが 2 cm の標的を貼り付け、堤体の滑動量を測定した。また、碎石と堤体の静止摩擦係数を求めるために水中で水平載荷試験を行った。静止摩擦係数は堤体の水中重量を 50, 70, 90 kg f に変え、堤体が滑動を始める時の水平載荷力と堤体の水中重量の比として求めた。

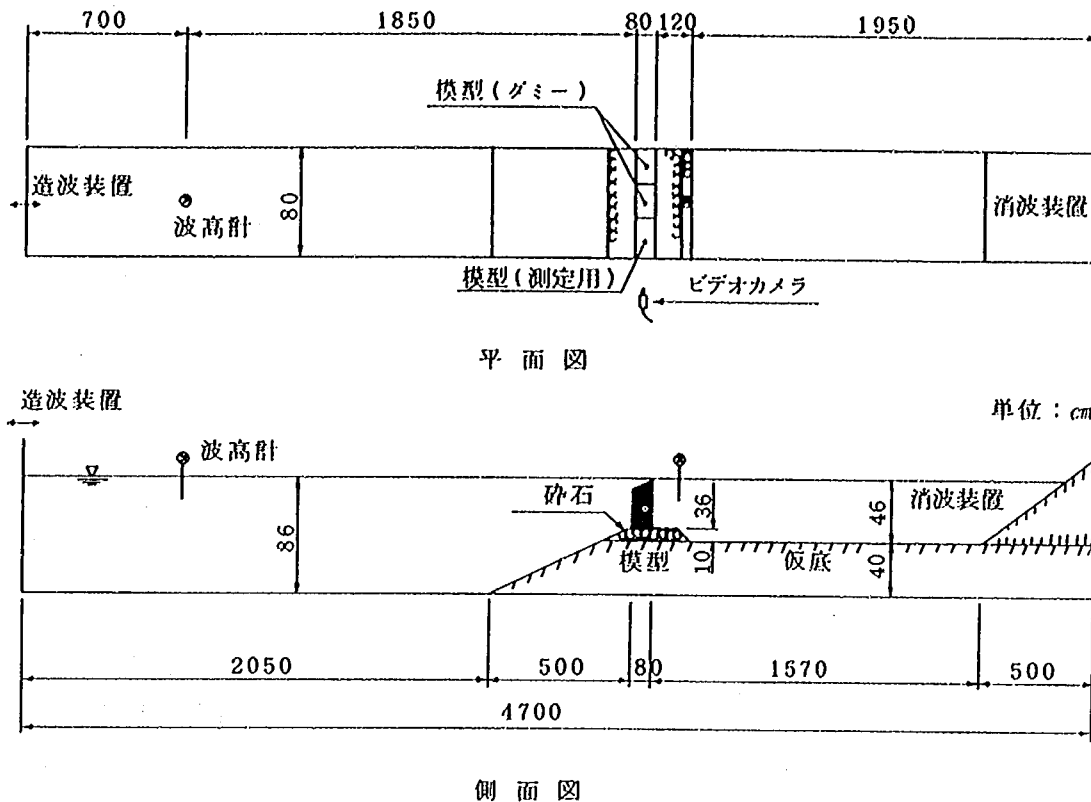
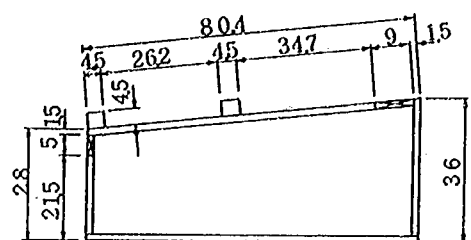
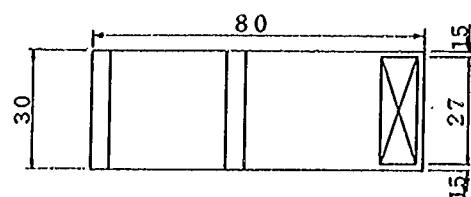


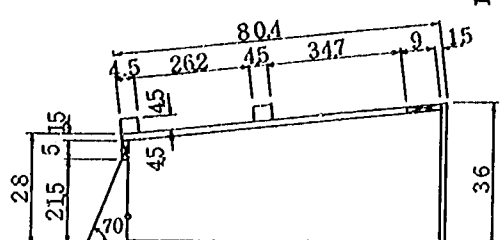
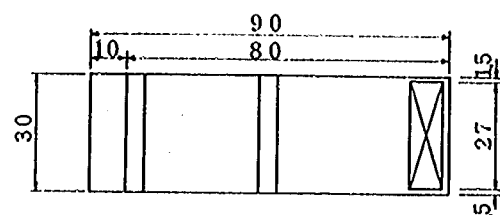
図 10.14 実験装置

模型の縮尺は $1/25$ とした。実験に用いた模型形状は、波力実験に用いた形状を基本形状（タイプ 1）とした（図 10.15(a) 参照）。堤体の安定性および波力の低減を図ることを目的としてタイプ 1 を 5 種類変化した。タイプ 2 は、堤体の安定性を向上させるために堤体重量を増すことを目的としてタイプ 1 の前面および斜板の開口を塞いだものである（図 10.15(b) 参照）。タイプ 3 は、堤体底面に作用する揚圧力を低減するために直径 42mm のパイプを堤体底面から斜板まで通したものである（図 10.15(c) 参照）。パイプは堤体の前側、中間、後側にそれぞれ 3 箇所、合計 9 箇所取り付け、開口率は 5.2 % とした。タイプ 4 は、堤体に作用する水平力を低減するために堤体前面の傾斜角を 70° にしたものである（図 10.15(d) 参照）。また、実験中、堤体前面の突起に衝撃砕波力が作用する状況が観察されたため、前面の突起を除去したタイプ 5 についても実験を行った（図 10.15(e) 参照）。タイプ 6 は、堤体に作用する水平力・揚圧力の両方を低減するためにタイプ 3、4 を組み合わせたものである（図 10.15(f) 参照）。現地と模型の対比を表 10.3 に示す。

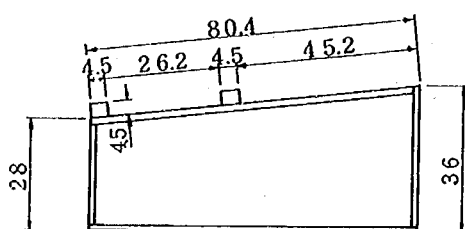
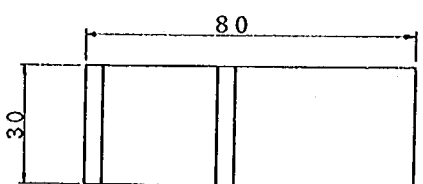
單位：cm



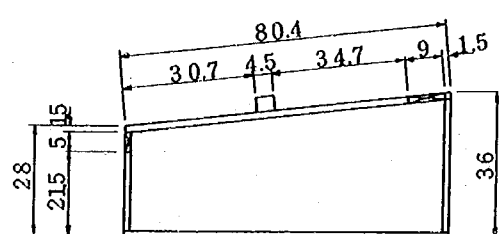
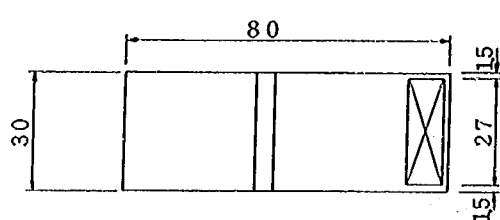
(a) タイプ1



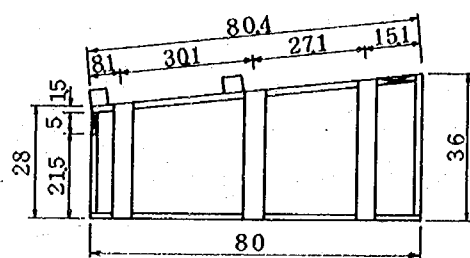
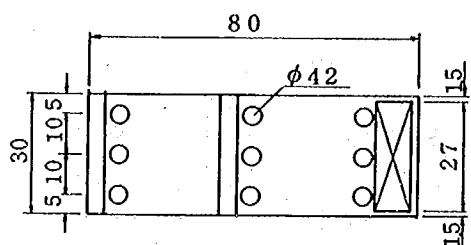
(d) タイプ4



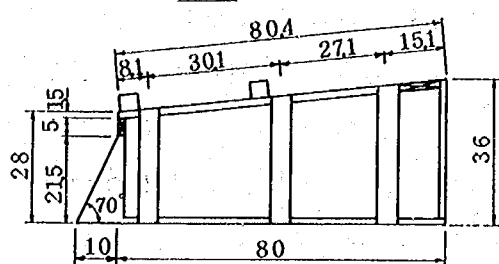
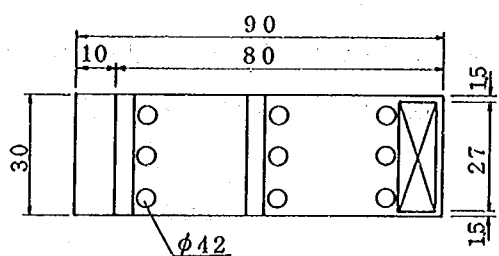
(b) タイプ 2



(e) タイプ 5



(c) タイプ 3



(f) タイプ6

図 10.15 模型概要 (タイプ1~タイプ6)

表 10.3 構造条件

諸 元		実 験	現 地	記 号
堤 体 幅 B		80 cm	20 m	
前面天端高 h_1		28 cm	7 m	
後面天端高 h_2		36 cm	9 m	
突起	S_1	4.5 cm	1.125 m	
	S_2	4.5 cm	1.125 m	
斜板勾配 i_s		1/10	1/10	
前面開口率 ϵ_1		9.1%	9.1%	
斜板開口率 ϵ_2		10.3%	10.3%	
底板開口率 ϵ_3		0, 5.2%	0, 5.2%	
前 面 傾 斜 θ		$90^\circ, 70^\circ$	$90^\circ, 70^\circ$	
水 深 h		36 cm	9 m	
没 水 深 R		0	0	

10.3.2 実験条件

実験条件を表 10.4 に示す。海底勾配 i は急勾配に相当する $1/10$ とした。急勾配では水深 h が小さくなれば作用波力が大きくなることが波力実験により確認されたため、 L, W, L 時を想定して $h = 36\text{cm}$ とした。周期 T は波力実験に用いた周期のうち作用波力が最大となる 2.4 sec である。波高 H は堤体に衝撃砕波力が作用するように、観察により巻き波砕波が堤体に衝突する条件に設定した（写真 10.1 ~ 10.3 参照）。波高の検定は図 10.16 に示すように、堤体を設置しない状態で容量式波高計①~⑥を用いて行った。設定波高は波高が 42.5 cm の場合とした。

表 10.4 実験条件

海底勾配 i	水 深 h (cm)	周 期 T (sec)	波 高 H (cm)
1/10	36	2.4	42.5

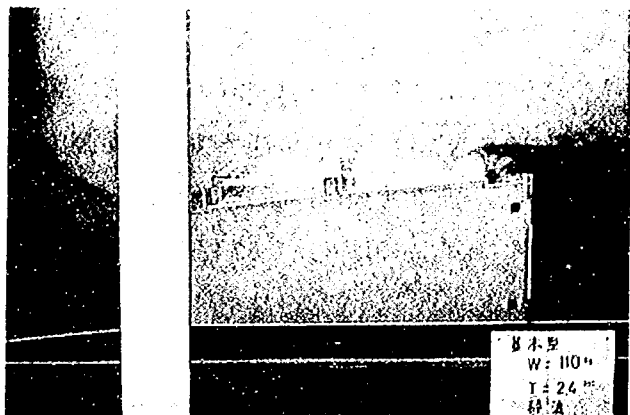


写真 10.1 波の作用状況 (1)



写真 10.2 波の作用状況 (2)

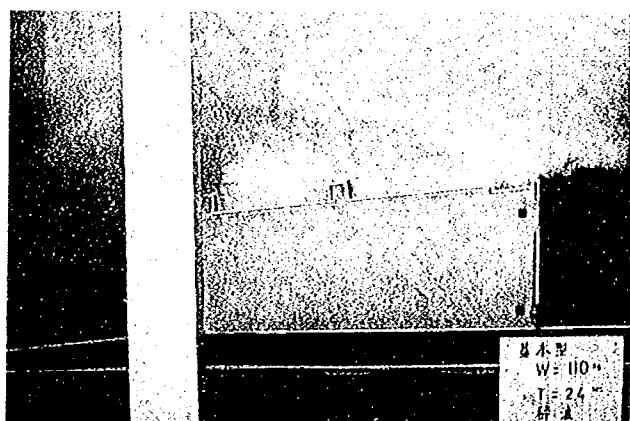


写真 10.3 波の作用状況 (3)

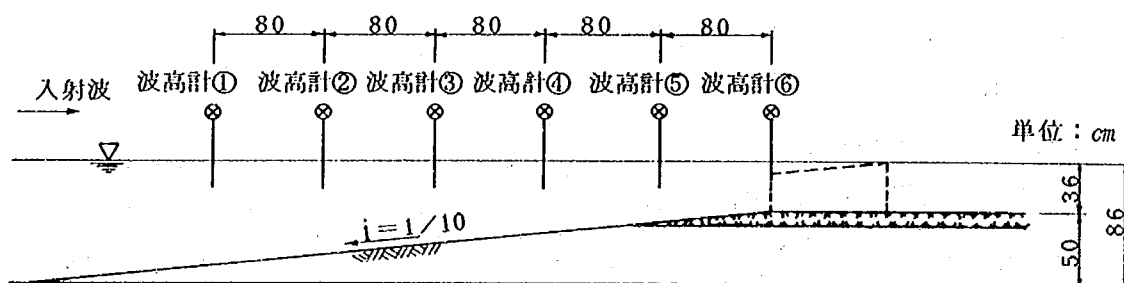


図 10.16 波高計設置位置

10.3.3 実験結果

(1) 静止摩擦係数

図 10.17 は各タイプについて、堤体の水中重量 W と水平載荷力 F_H の関係を示したものである。図中の点線は静止摩擦係数 $\mu = 0.4, 0.5, 0.6$ の場合を示している。実験値は μ が $0.45 \sim 0.6$ の範囲でばらついているが、これは砕石のかみ合せや、砕石の表面の不陸の状態が実験毎に微妙に異なるために生ずるものである。各タイプの実験値には顕著な違いはみられず、平均的には $\mu = 0.55$ 程度であった。

(2) 滑動状況

図 10.18 は横軸に波数 N 、縦軸に総滑動量 S_o を取り、堤体の水中重量が $W = 2.67 \text{ kg f/cm}$ の場合の 1 波ごとの滑動状況を示したものである。ただし、タイプ 2 は $W = 2.67 \text{ kg f/cm}$ の場合、滑動量が大きく図中に表わせなため省略した。各タイプとも 1 波目、2 波目の滑動量は大きいですが、徐々に小さくなっている。これは堤体に波力が繰り返して作用するにつれて、砕石のかみ合わせが増したり、堤体後趾が砕石内に沈下し砕石の受働抵抗が増したためである。図 10.19 は横軸に W 、縦軸に 1 波目から 6 波目までの 1 波ごとの平均滑動量 S_m を取り、 W を種々変化させた場合の S_m をプロットしたものである。図中の曲線は各タイプごとにプロット値を滑らかに結んだもので、この曲線と横軸の交点は $S_m = 0$ となる滑動限界水中重量 W_{00} を表わしている。タイプ 2 は、 W を大きくしても滑動が止まらず、他のタイプに比べて滑動の安定性が劣ることがわかる。これは、他のタイプにはいずれも堤体の前面および斜板に開口部があるのに対して、タイプ 2 にはこれらの開口部がないことにより生じた結果である。堤体の斜板および前面の開口部が消波性能を高める上で大きな効果があることは前報¹⁾より明らかであるが、滑動実験よりこの開口部は W_{00} を低減する効果もあることがわかる。底板にパイプを取り付けたタイプ 3 は $W < 2.5 \text{ kg f/cm}$ ではタイプ 1 よりも S_m が小さいが、 W_{00} 付近では $W < 2.5 \text{ kg f/cm}$ の場

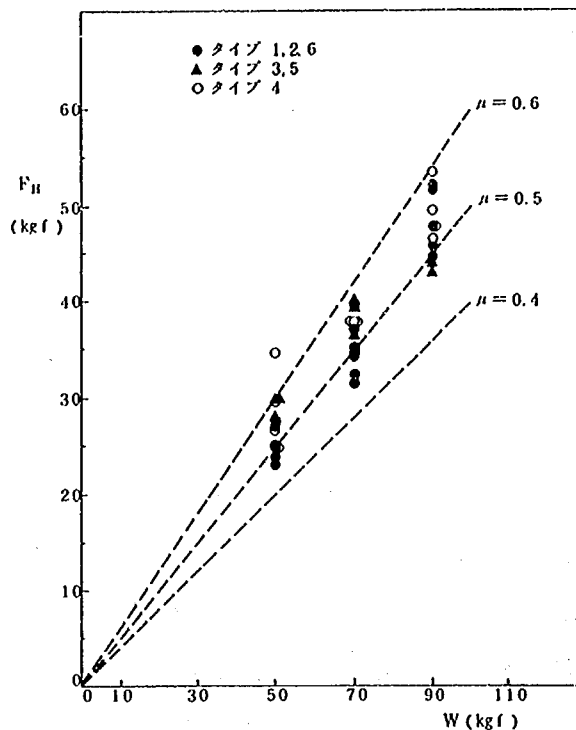


図 10.17 堤体の水中重量 W と水平載荷力 F_H の関係

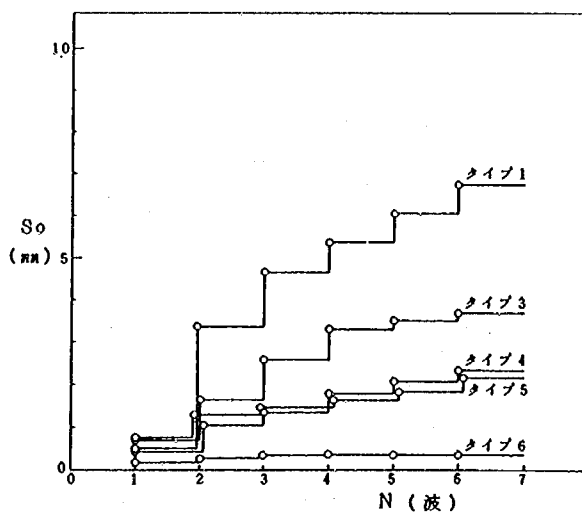


図 10.18 波数 N と総滑動量 S_o の関係 ($W = 2.67 \text{ kg f/cm}$)

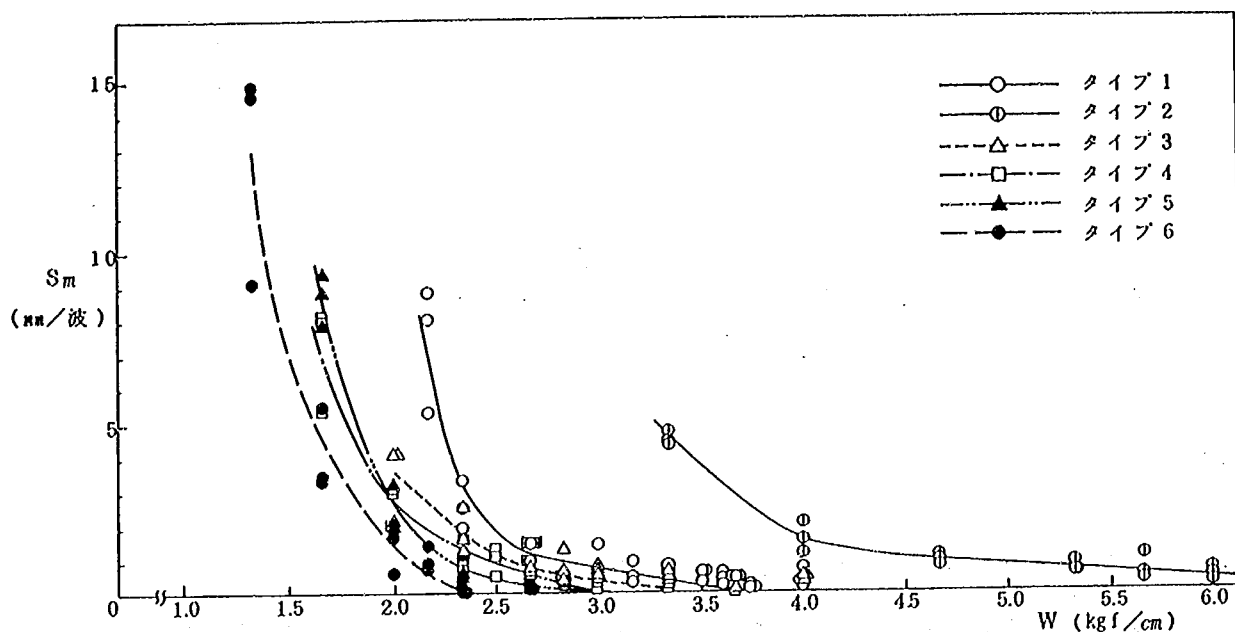


図 10.19 堤体の水中重量 W と平均滑動量 S_m の関係

合ほど顕著な差異は認められない。タイプ 3 はタイプ 1 に比べ W_{oc} を 10% 程度小さくすることができる。タイプ 4, 5 は W と S_m の関係が類似しており、タイプ 1 に比べて W_{oc} を 20~25% 低減することができる。しかし、タイプ 5 の場合は、堤体前面に突起がないため碎波が促進されず、前報¹⁾より透過率 K_T は 0.1 程度高くなることが予想される。タイプ 6 はタイプ 1 に比べて W_{oc} を 40% 程度低減することができる。また、実験中の観察によるとタイプ 3~6 はタイプ 1 にみられる堤体前趾での 1 mm 程度の浮き上がりがみられなかった。図 10.20 は横軸に各構造タイプを、縦軸に滑動限界時と 1 波あたりの滑動量が 5 mm の時の堤体重量 W_o を現地換算空中重量としてプロットしたものである。 W_c は実験で得られた $\mu = 0.55$ を通常の滑動安定計算に用いられる $\mu = 0.6$ に換算して、次式を用いて求めた。

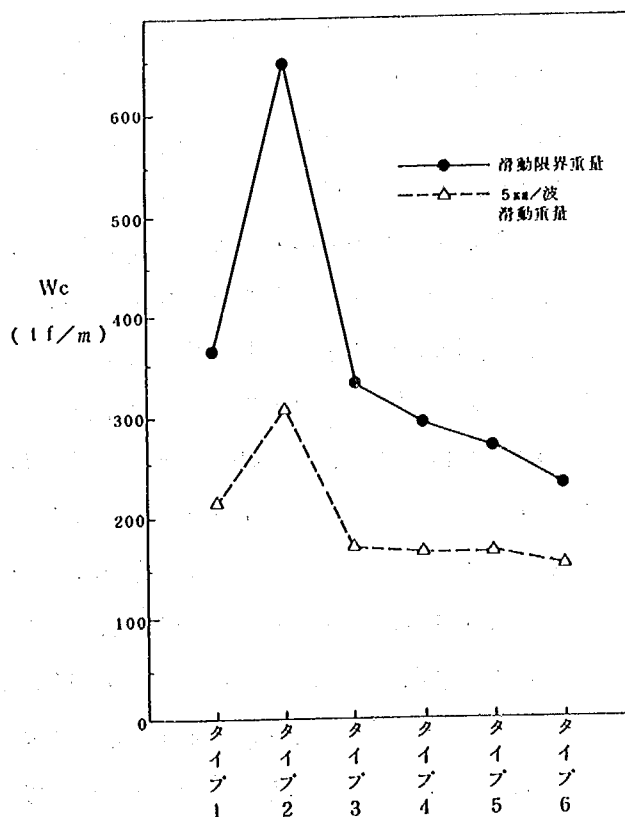


図 10.20 各タイプの滑動限界重量

$$W_c = \frac{0.55}{0.6} \times \frac{0.1 W_{oc}}{\lambda^2} \times \frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1} \quad (\text{tf/m}) \quad (10.1)$$

ここで、 λ は模型縮尺 $1/25$ 、 γ_0 はコンクリートの単位体積重量 2.45 tf/m^3 である。各タイプに対する W_c は、タイプ2の 650 tf/m 程度からタイプ6の 230 tf/m 程度まで大きな差異がある。タイプ2の場合、堤体上部まで砂を用いて中詰することができるためタイプ1より堤体重量を20~30%大きくすることができるが、 W_c が80%も大きくなるため、現状の構造型式で滑動を止めることは困難である。一方、タイプ6の場合、 W_c は 230 tf/m でありタイプ1に比べ W_c を40%低減することができる。これは、堤体コンクリート自重と中詰砂の重量により実現可能な堤体重量である。

10.4 まとめ

斜板消波潜堤に作用する波力の特性を最初に要約する。

- ① 水平力 F_x 、鉛直力 F_z の測定記録より、海底勾配 $i = 1/10$ の場合は衝撃砕波力が作用するが、 $i = 1/50$ の場合は衝撃砕波力が作用しないことがわかった。
- ② 堤体の安定計算を行う場合、 F_x 、 F_z の位相および力の作用方向を考慮する必要がある。非砕波の場合、 F_z が最大の時、堤体の滑動に対する安定性が最も低くなる。衝撃砕波力が作用する $h = 9 \text{ cm}$ 、 $T = 1.2 \text{ sec}$ 、 $H = 9.2 \text{ cm}$ 、 $i = 1/10$ の場合、堤体の安定上最も注目しなければならないのは、鉛直上向き、下向きの力が最大となる場合である。 F_z が最大となる時は堤体に最大の揚圧力が作用している時であり、この時 F_x も最大に近い。このため、堤体の滑動に対する安全性が最も低くなる。また、鉛直下向きの力の最大値が作用するとき、 F_x は最大となるため堤体の端趾圧が最大となり、地盤の支持力に対する安全性が最も低くなる。
- ③ 海底斜面に続く水平床上に斜板消波潜堤を設置する場合、砕波点から堤体設置位置までの距離の違いにより F_x 、 F_z は変化する。 F_z の方が F_x よりもこの距離の違いの影響を受けやすいが、海底斜面の法肩の位置に設置した場合に F_x 、 F_z は最大となる。
- ④ 潮位差が大きいかつ海底勾配が急な海域に斜板消波潜堤を設置する場合、設計波の周期が長くなると H 、 W 、 L 、 T と L 、 W 、 L 、 T の水深の違いにより鉛直力が大きく変化する。鉛直力が大きく変化する条件は、現地波浪で $T \geq 10 \text{ sec}$ 、 $i = 1/10$ 、潮位差 $\Delta h = 3.0 \text{ m}$ である。
- ⑤ 斜板消波潜堤に作用する F_x は、直立防波堤の $0.2 \sim 0.65$ 倍である。これは、本構造が没水型であるため砕波した波が越波し、波峰部分の衝撃砕波力を受けにくいことを示している。一方、 F_z は直立防波堤の $0.5 \sim 1.35$ 倍であり、直立防波堤よりも揚圧力が大きくなる場合がある。この原因は直立防波堤の場合、揚圧力が三角形分布であるのに対し、潜堤では波が透過することにより、揚圧力が台形分布となるためである。

次に、急勾配海岸で衝撃砕波力が発生する場合を対象とした滑動実験の結果を以下に要約する。

- ① タイプ1の場合、滑動限界重量 W_c は 370 tf/m 程度である。構造上この重量を確保するためには、消波機能上要求される最小断面より大きな断面が必要となり不経済となる。

- ② タイプ2は堤体上部まで砂を中詰することができるため、タイプ1より堤体重量を20～30%増すことはできるが、 W_c が80%も大きくなるため、現状の構造型式で滑動を止めることは難しい。
- ③ タイプ3はタイプ1と比較して、 W_c を10%程度低減することができる。
- ④ タイプ4、5はタイプ1と比較して、 W_c を20～25%程度低減することができる。ただし、前面粗度を撤去したタイプ5は K_T が0.1程度高くなることが予想される。
- ⑤ タイプ6はタイプ1と比較して、 W_c を40%程度低減することができる。 W_c は230tf/m程度であり、消波機能上要求される最小断面でも堤体コンクリートと中詰砂重量により実現可能な堤体重量である。

10.5 今後の研究課題

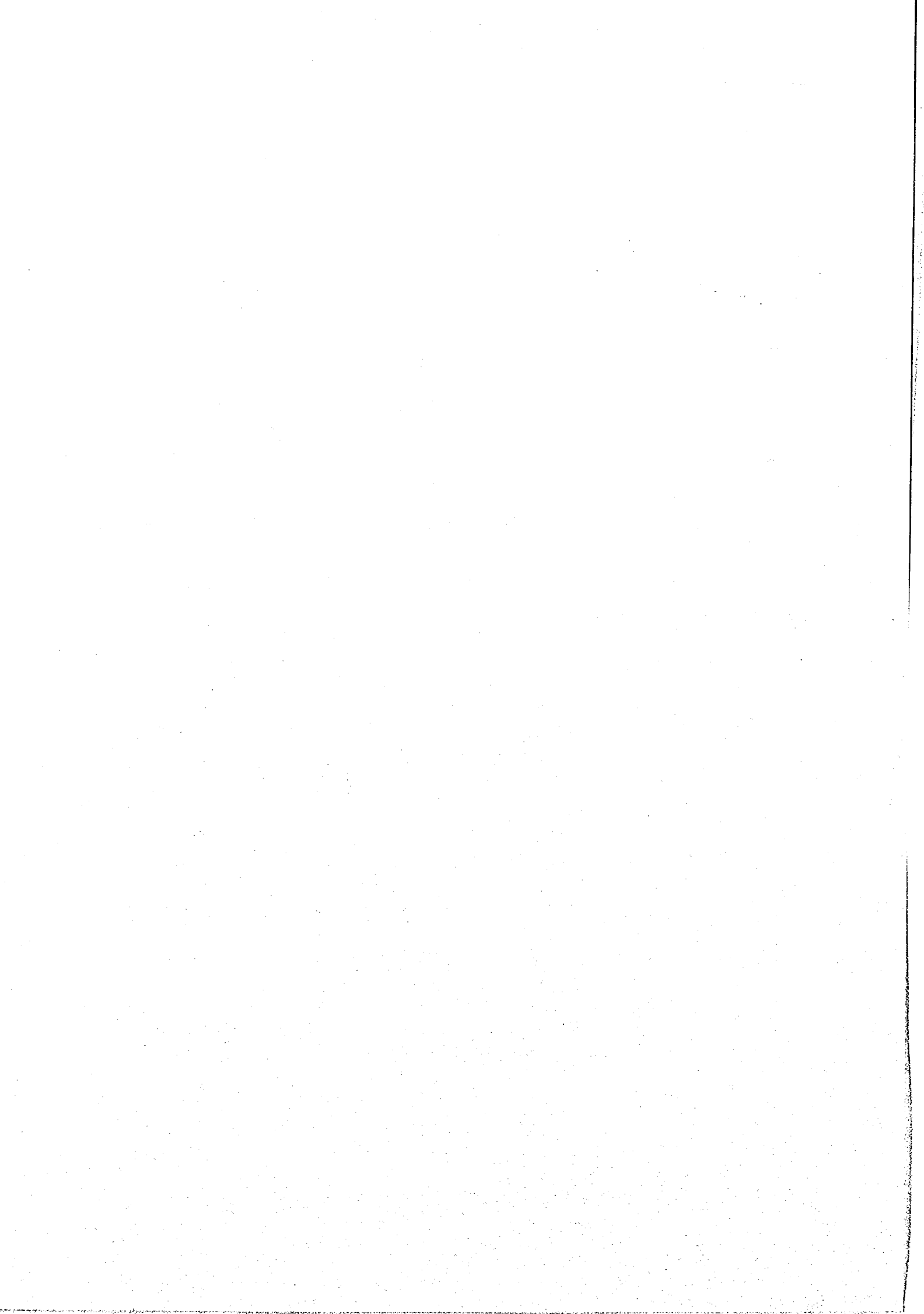
- ① 今回の滑動実験の結果選定されたタイプ6に関して、堤体前面の傾斜角度や底板の開口率の変化による波力の違いを調べ、さらに安定性のよい構造物に改良する。
- ② 堤体の各部材を設計するために、各部材に作用する局部波力を把握する。
- ③ 衝撃砕波力が発生しにくい緩勾配海岸に対しても、経済的な設計ができるように種々の波浪条件について波力実験を行う。
- ④ 堤体の設置により生ずる洗掘の特性、および周辺海域の漂砂特性を実験により明らかにするとともに、その予測手法を確立する。
- ⑤ 斜板消波潜堤の設計方法、施工方法を検討するとともに経済性を追求する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：海域制御構造物に関する共同研究報告書(2)，土木研究所資料，No.2510，pp. 111～123，1987.
- 2) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，p. 142.，1975.
- 3) Mitsuyasu, H. : Experimental study on wave force against a wall, Rept. Trans. Tech. Res. Inst., No. 47, 39p., 1962.
- 4) 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司：直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察，港研報告，Vol. 22, No. 4, pp. 3～31，1983.

第11章 斜板消波潜堤の洗掘に関する 実験的検討

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
			山本	幸次	
	部外研究員	館	克彦		



11.1 まえがき

斜板消波潜堤は、外海に面する沿岸域を有効利用するための海域制御構造物の1つとして提案されたものであり、その消波性能の概略については既に明らかになっている。¹⁾しかし、堤前面開口部位置の最適化や、開口部位置が洗掘や流況へ及ぼす影響などに関して問題点が残されていた。

本実験の目的は、斜板消波潜堤の洗掘に及ぼす影響を明らかにすることである。このため固定床による流況実験により前面開口部位置が流況に与える影響について検討した。あわせて開口部位置を変えたときの消波効果の違いや、開口部位置における流速も測定した。さらに移動床において洗掘実験を行い、固定床実験で観察された流況が洗掘に及ぼす影響を明らかにした。

斜板消波潜堤の概念図を図11.1に示す。この構造物は、海域の景観を損なわないように没水型構造物としたところに特徴がある。その消波機構は以下の2つである。

- ① 斜板上に栈粗度を配置することで入射波を強制的に砕波させ、波の乱れを促進させる。
- ② 斜板後方と堤体前面に開口部を設けて堤岸側の水塊の落ち込みを防止し、また波の位相差により消波を図る。

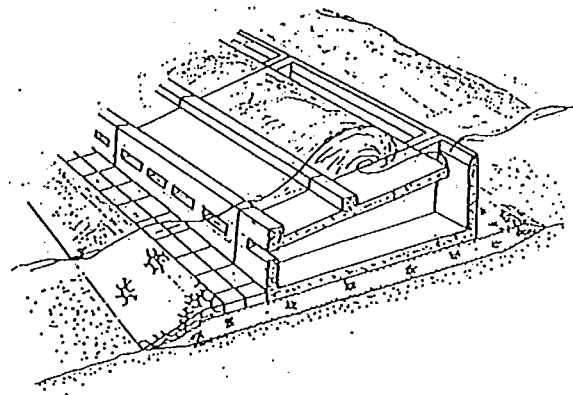


図11.1 斜板消波潜堤概念図

11.2 流況測定実験

11.2.1 実験方法

流況測定実験は、前面開口部位置が流況に与える影響を明らかにするため行うものである。実験には建設省土木研究所水理共同実験棟内小型造波水路を用いた。水路は全長33m、幅0.3m、高さ0.8mである。水路床は、造

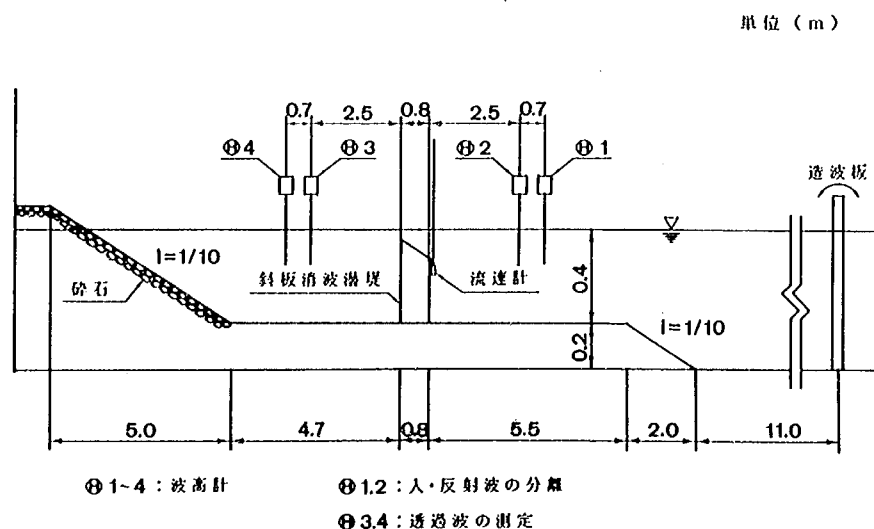


図11.2 流況実験、洗掘実験の装置

単位 (c m)

① 下方開口部
② 上方開口部
③ 斜板後方開口部

1.5 9.0 80.4 69.9 34.7 4.5 26.2 4.5 1.5 1.5 1.5 9.0 5.0 7.5 28.0 4.5 7.5

40.0 36.0 4.0

1:10

80.0

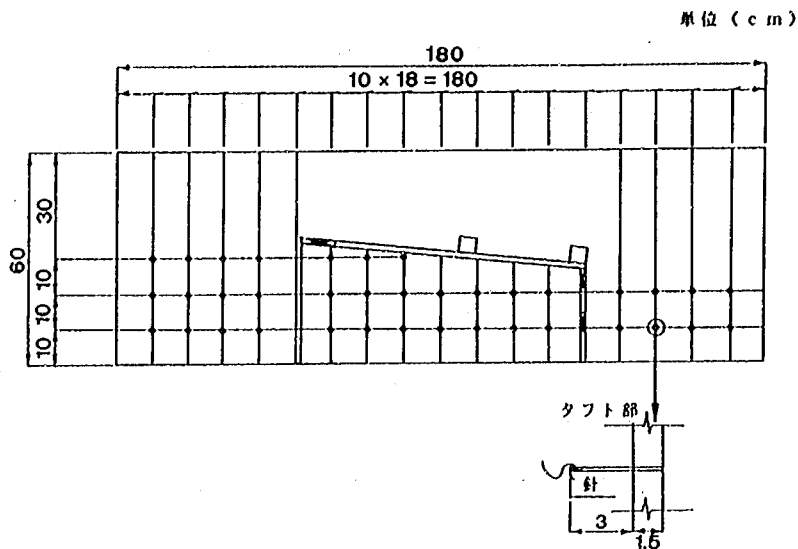


図 11.4 流況測定用タフト位置図

11.2.2 実験結果

まず消波効果の実験結果を示す。表 11.1 の波浪条件の下で堤前面開口部位置と上方と下方にした場合の消波効果を求めた。反射率 K_R と波形勾配 H/L の関係を図 11.5 に示す。各波形勾配で、 K_R は開口部を上方にした方が下方に対し 1.2 倍程度大きくなっていることがわかる。ただし長周期波の K_R は下方開口部の方が若干高くなっている。しかし K_R は、ほとんど $K_R < 0.4$ と小さく、消波効果の目標値 $K_R \leq 0.5$ は満足している。

次に、透過率 K_T と波形勾配 H/L の関係を示す (図 11.6)。 K_T は波形勾配 $H/L < 0.02$ で少し高くなっている。一般に長周期波は短周期波に比べて潜堤上で碎波しにくく、このため K_T が大きくなったと考えられ

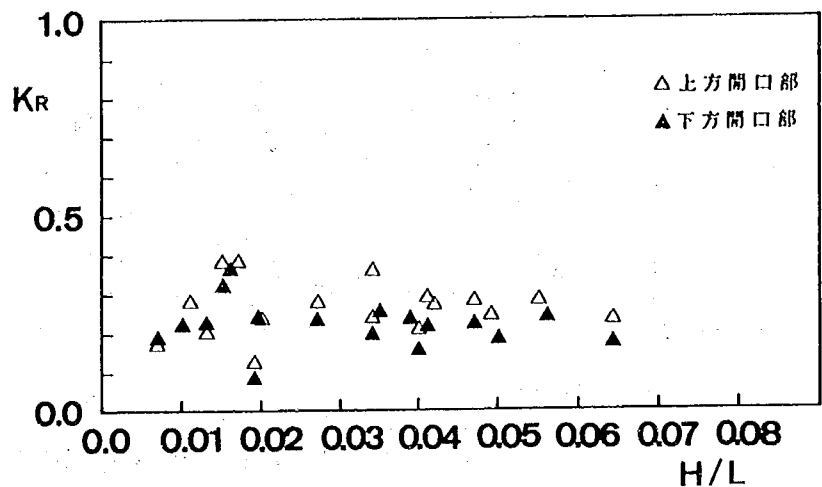


図 11.5 K_R と H/L の関係

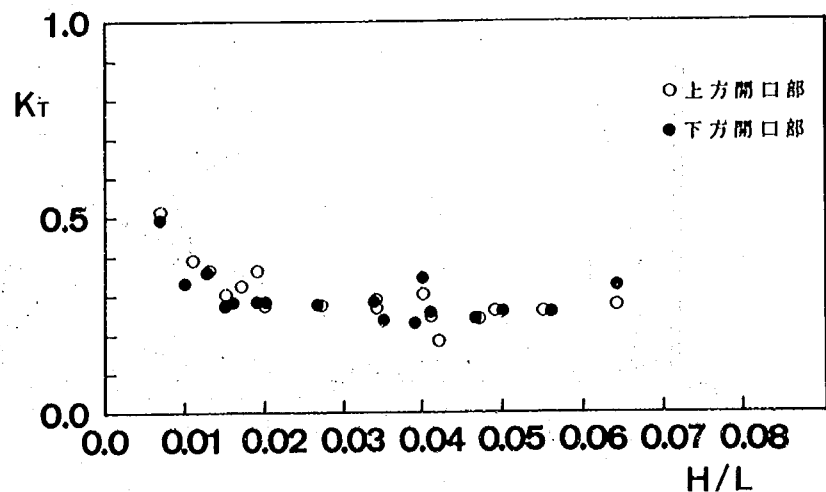


図 11.6 K_T と H/L の関係

る。それに対して $H/L > 0.02$ では、開口部位置によって K_T はほとんど変わらない。この結果より、開口部位置を上方、下方いずれとしても、海域制御構造物の消波効果の目標 $K_T \leq 0.6$ を満足することがわかる。

次に、流況測定の結果について示す。波浪条件 = 2.0 sec, $H = 12\text{cm}$ のもとで、下方開口部の流況を示す (図 11.7)。この図はシリコンボールの動きを 0.5 sec (1/4 周期) ごとにトレースしたものである。さらにその時の水面形も同時に示す。水面形は堤前面に波の谷が来たときの時刻を 0 とし、0.5 sec (1/4 周期) ごとの概形である。堤内では二つの循環流が見られる。1つは斜板後方開口部から堤後半部で起きている反時計回りの流れである。もう1つは堤前半部で起きている時計回りの流れである。さらに前面開口部から局所洗掘に影響を及ぼすと思われる下向き流れが生じている。また、斜

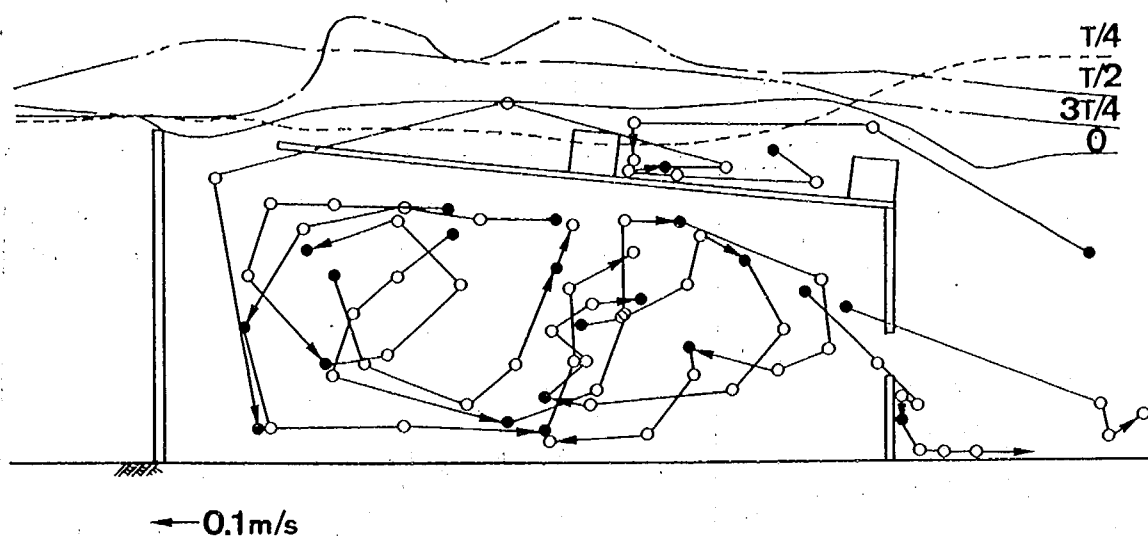


図 11.7 斜板消波潜堤内・外の流況
(下方開口部, $T = 2.0\text{ sec}$, $H = 12\text{cm}$)

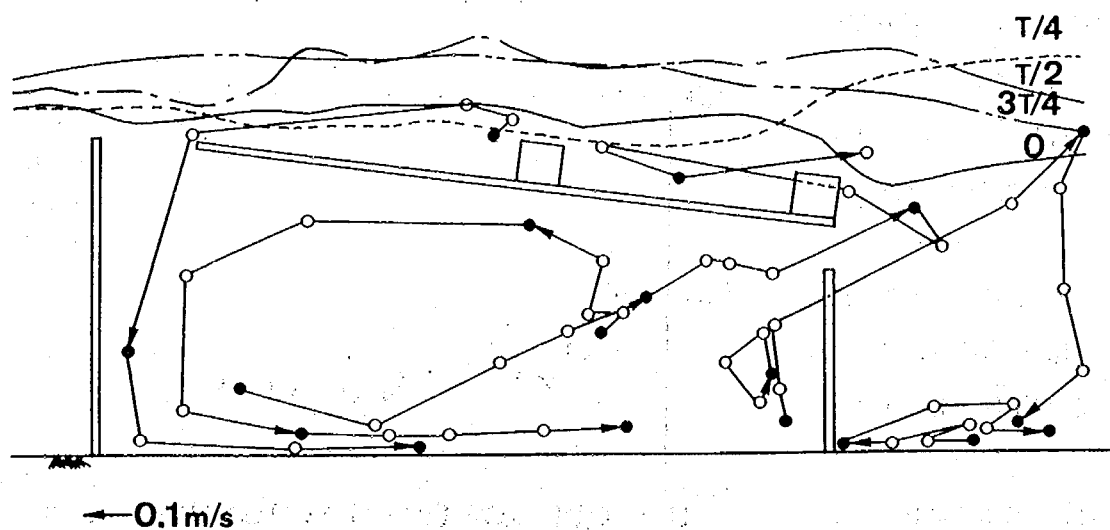


図 11.8 斜板消波潜堤内・外の流況
(上方開口部, $T = 2.0\text{ sec}$, $H = 12\text{cm}$)

板上では、栈粗度間で反時計回りの小さな循環流が生じている。また、栈粗度上を越えた波は斜板後方開口部に落ち込むことがわかる。さらに堤岸側の地盤面近くのタフトはほとんど動いていないことが確認された。このことにより堤岸側に伝播する波によっては、洗掘に及ぼすような流況は発生していないことが予想される。

同様にして得られた上方開口部の場合の流況を示す(図11.8)。堤内では斜板後方開口部から堤前面開口部に向かうかなり強い流れが生ずるとともに、一部の水が斜板下部において戻り流れとなり、全体として大きな反時計回りの循環流が形成されている。さらに、堤前面開口部の堤内側下部には反流として規模の小さい循環流が生じている。上方開口部からの流れは斜め上向きであることから判断すると、

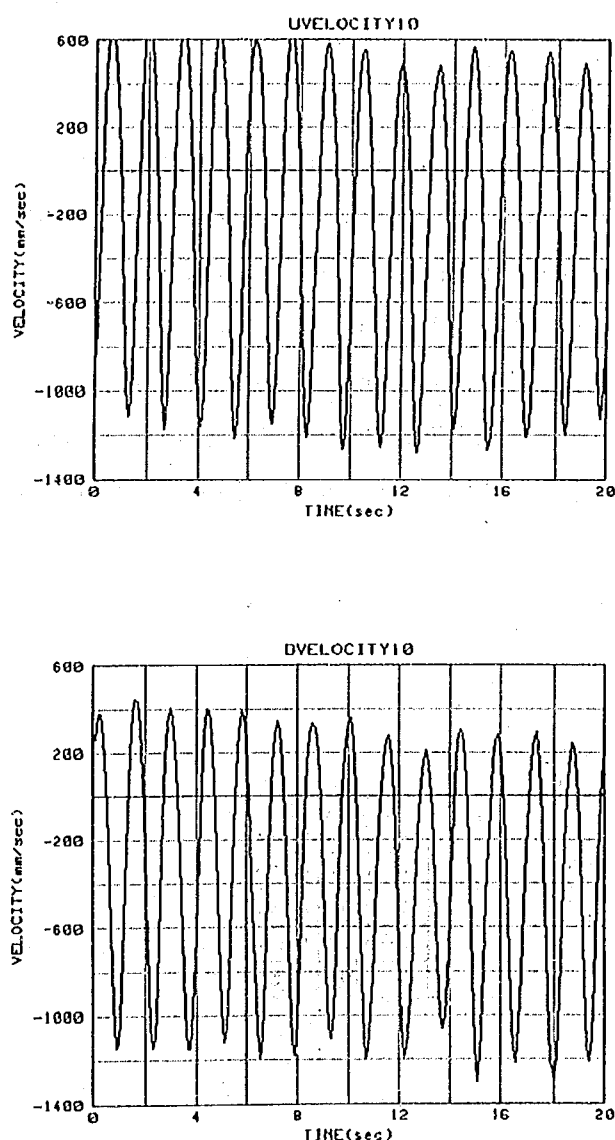


図 11.9 流速波形 ($T=1.4$ sec, $H=16$ cm)
(a) 上方開口部, (b) 下方開口部

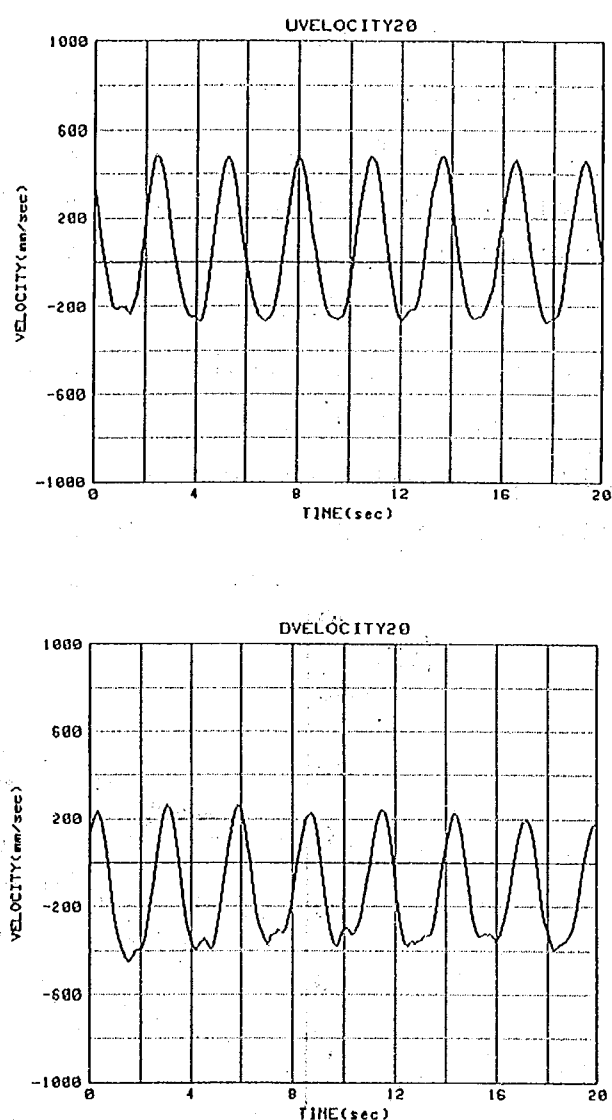


図 11.10 流速波形 ($T=2.8$ sec, $H=4$ cm)
(a) 上方開口部, (b) 下方開口部

この流れによる局所洗掘は生じないと考えられる。さらにこの流れは反射率 K_R が下方より上方の方が大きいことの一つの理由を与える。また、この場合でも堤岸側への落ち込み流れが洗掘に及ぼすような流速は発生しなかった。

次に、堤前面口部の流速を示す。流速測定は各波浪条件において行った。流速測定には電磁流速計を用い、開口部中央部にプローブを設置した。図 11.9 は波浪条件 $T = 1.4 \text{ sec}$, $H = 16 \text{ cm}$ の流速の時間的变化で、(a)が上方開口部、(b)が下方開口部のときである。図中で入射波伝達方向を正とした。両開口部とも噴き出し流れが卓越していることがわかる。次に図 11.10 は波浪条件 $T = 2.8 \text{ sec}$, $H = 4 \text{ cm}$ のデータである。この図で(a)の上方開口部において吸い込み流れが卓越していることがわかる。また図 11.7 に示した開口部が前面下方の場合の流況図において、堤前半部に時計回りの循環流が生じていたが、これは図 11.9, 10で見られる吸い込み流と関連付けられる。つまり図 11.7 において堤前半部下部の流速が速いことから、この流況は堤後半部から発達した循環流に対する反流として形成されたものでなく、主として前面開口部からの吸い込み流により誘起されたと考えられる。

各波浪条件の下で測定された冲向きと岸向きの最大流速の平均値 V_{mean} と波形勾配 H/L の関係を示す(図 11.11)。 H/L と V_{mean} の間にはほぼ正比例の関係が成り立っている。さらにこの図より下方開口部の方が噴き出し流速が大きいことがわかる。またこの図で各周期をパラメータとして示しているが $T = 1.4 \text{ sec}$ ($B/L = 0.335$) 付近で両開口部とも V_{mean} が最大値をとる傾向を示している。また図 11.10 でも示したように上方開口部の流速のうち波形勾配の場合に開口部で吸い込み流が生じている。これについては次のような理由が考えられる。長周期波になるほど斜板上で碎波が生じにくくなり、斜板後方開口部への水塊の落ち込み量が少なくなる。その結果、斜板後方開口部から堤内を循環し前面開口部より噴き出す流量が減少するためと考えられる。

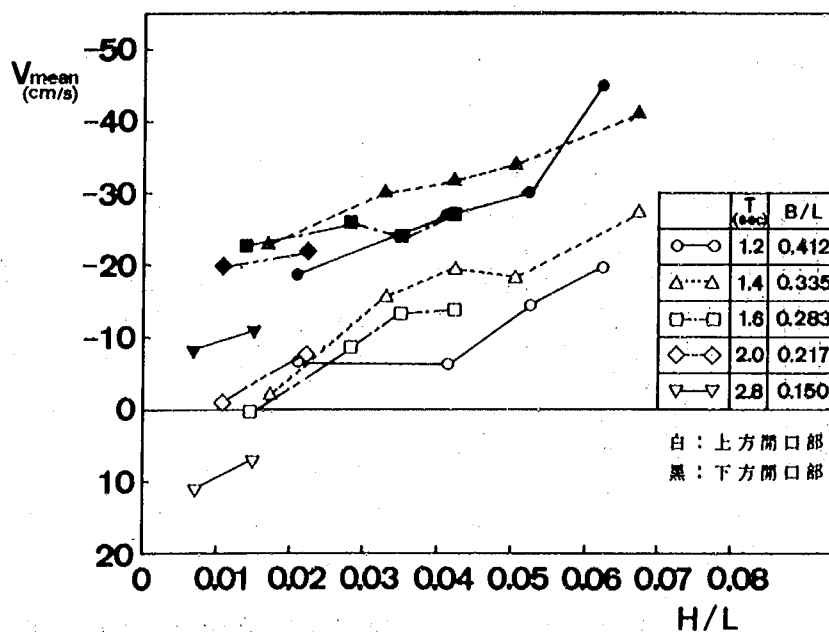


図 11.11 V_{mean} と H/L の関係
(白：上方開口部、黒：下方開口部)

11.3 洗掘実験

11.3.1 実験方法

洗掘実験では、斜板消波潜堤が洗掘に及ぼす影響について実験的に検討した。実験は固定床実験と同じ小型造波水路で行った。また水路床や模型設置位置は固定床の場合と同じとした。模型は堤側面や下面におけるパイピング現象を防止するため堤前面下と後方に板を固定しシリコンによって完全止水した。底質には中央粒径 $d_{50} = 0.28 \text{ mm}$ の砂を用いた。実験ケースは表 11.2 に示す 3 ケースである。ここで波浪条件は $T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$ とし、さらに比較のため周期を変えた条件で開口部を上方とした場合の実験 ($T = 1.2 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$) を行った。波の作用時間は、事前に行った予備実験より、地形が安定するに要する 1 時間とした。水路上の台車に取り付けたポイントゲージにより地形変化量を測定し、水路横に取り付けたエスロンテープにより岸沖方向距離を測定した。地形は、造波機を止め波が静まった後に水路中央測線上で測定した。地形測定においては砂漣の山と谷を読み落とさないように注意した。

表 11.2 波浪条件 (洗掘実験)

実験ケース	開口部位置	波高 $H \text{ (cm)}$	周期 $T \text{ (sec)}$	反射率 K_R	透過率 K_T
1	上部	12	2.0	0.14	0.39
2	上部	12	1.2	0.29	0.26
3	下部	12	2.0	0.15	0.41

11.3.2 実験結果

図 11.12～14 は堤周りの地形変化を表わしたものである。ここで縦軸は堤前面部下端をからの高さ h ，横軸は堤後端からの沖向き距離 X である。

図 11.12 はケース 1 (上方開口部, $T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$) の地形変化である。この図より反射波の $1/2$ 波長のサンドバーの形成がみられる。これは反射波による部分重複波の影響と考えられる。一方、堤岸側では透過波による地形変化は全く生じていない。また、堤前面の脚部において堆積の傾向が見られる。入江ら³⁾は底面流速 U_b ，砂の沈降速度 W から相対速度 U_b/W を求め、重複波の下での底質移動形式には大別して 2 タイプあることを見出している。 $U_b/W > 10$ において重複波の腹で堆積を生ずる L タイプと、 $U_b/W < 10$ では重複波の節で堆積を生ずる N タイプである。微小振幅波理論を用いて求

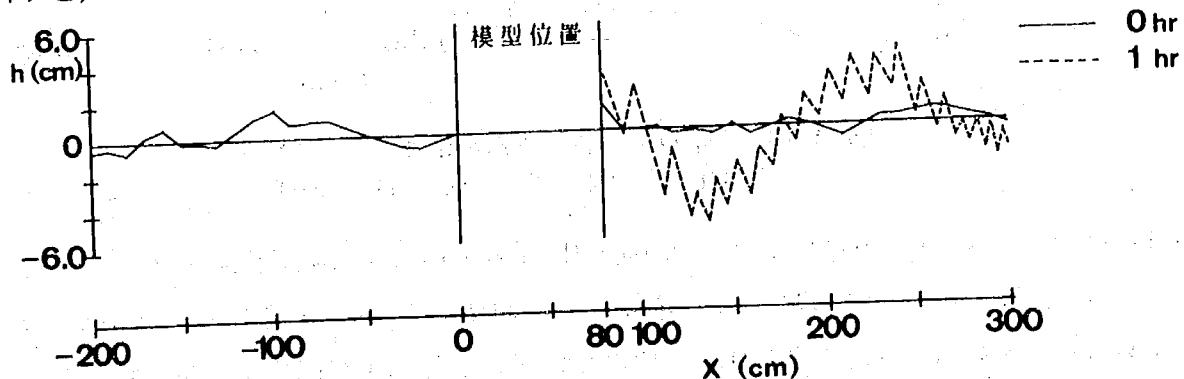


図 11.12 岸沖方向断面の地形変化 (ケース 1) (上方開口部, $T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$)

表 11.3 相対速度 U_b/W の計算結果

実験 ケース	波 高 H (cm)	周 期 T (sec)	底面速度 U_b (cm/sec)	沈降速度 W (cm/sec)	相対速度 U_b/W	タイプ
1, 3	12	2.0	25.6	4.9	5.2	N
2	12	1.2	18.6	4.9	3.7	N
現地 [*]	94	9.4	49.6	2.4	20.5	L

* 波浪は駿河海岸において最も出現確率の大きなもの、底質粒径は $d_{50} = 0.2\text{mm}$ を採用した。

めた U_b と Rubey⁴⁾ の式から求めた W を表 11.3 に示す。ケース 1～ケース 3 は堤脚部で堆積が生ずる N タイプである。しかし、現地では堤脚部に洗掘を及ぼすような L タイプが予想される。現地海岸の一例として表 11.3 に駿河海岸の場合の試算例を示す。ここで波浪は駿河海岸で最も出現確率の大きなもの、底質粒径は $d_{50} = 0.2\text{mm}$ を採用した。⁵⁾ $U_b/W = 20.5$ より現地では L タイプとなる。従って実験データをそのまま現地に適用するのは問題が残されている。よって現地海岸への適用を考える場合にはさらに十分な検討が必要である。

図 11.13 はケース 2 (上方開口部, $T = 1.2\text{sec}$, $H = 12\text{cm}$) の地形変化を示す。このケースはケース 1 と同一の開口部を持ち波の周期が異なる。ここでも反射波の $1/2$ 波長のサンドバーが形成されている。さらに堤脚部には明らかに堆積傾向が見られる。

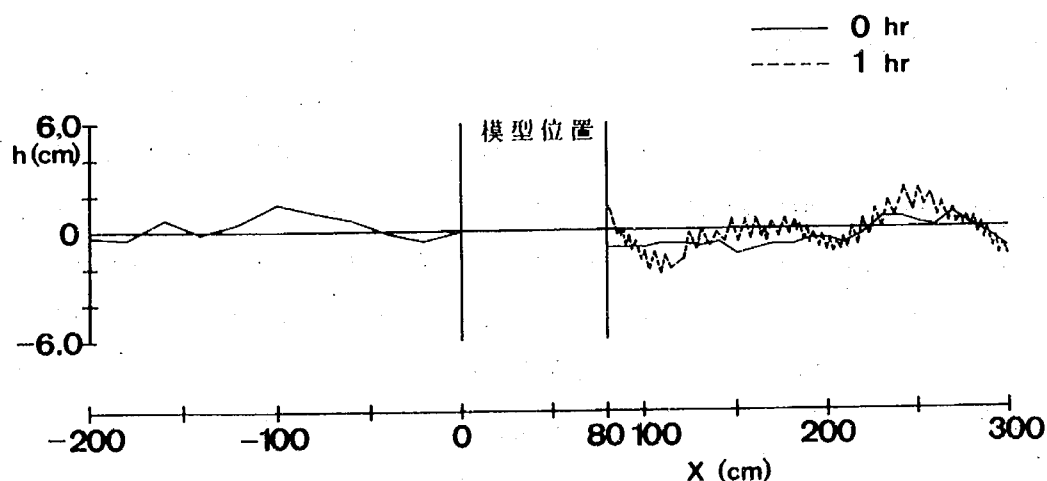


図 11.13 岸沖方向断面の地形変化 (ケース 2)
(上方開口部, $T = 1.2\text{sec}$, $H = 12\text{cm}$)

図 11.14 はケース 3 (下方開口部, $T = 2.0\text{sec}$, $H = 12\text{cm}$) の場合の地形変化を表す。ここで $X = 80\text{cm} \sim 135\text{cm}$ の位置に明らかに下方開口部からの噴き出し流れによる洗掘が見られる。この傾向は固定床実験で見られた流況と良く対応しており、下方開口部からの下向きの流れが洗掘を助長していたことがわかる。

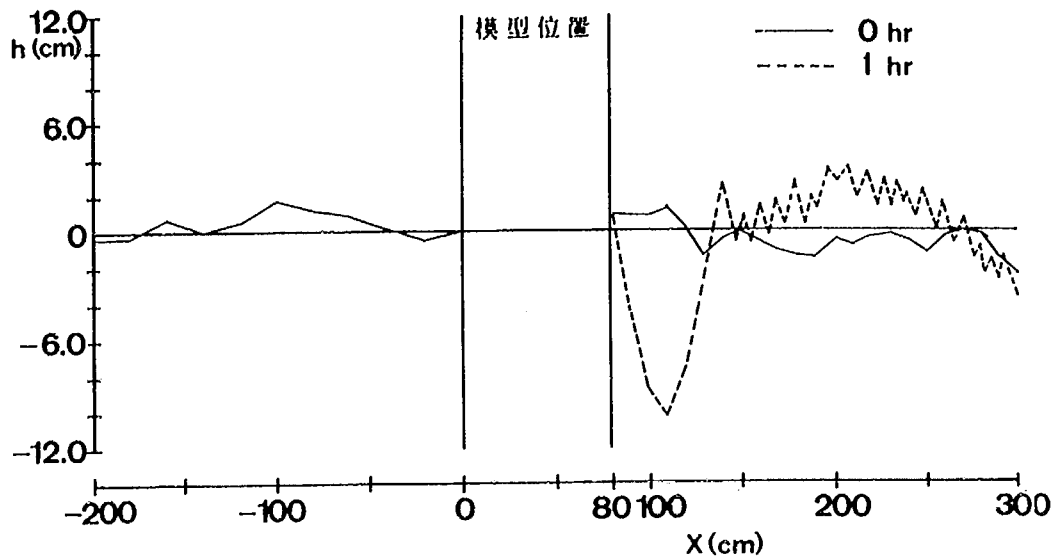


図 11.14 岸沖方向断面の地形変化 (ケース 3)
(下方開口部, $T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$)

初期地形に対する波浪作用後の地形の変化量 ΔY を図 11.15 に示す。ここで、実線はケース 1 (上方開口部), 破線はケース 3 (下方開口部) で波浪条件は $T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$ である。上方開口部では反射波による侵食が $X = 100 \sim 190 \text{ cm}$ の領域で最大 5 cm 起っているのに対し, 下方開口部では $X = 80 \sim 135 \text{ cm}$ の範囲で最大 11 cm の侵食が生じている。下方開口部の侵食域には砂澱が生じておらず, この部分は明らかに前面下方開口部からの噴き出し流れにより形成されたことを示している。

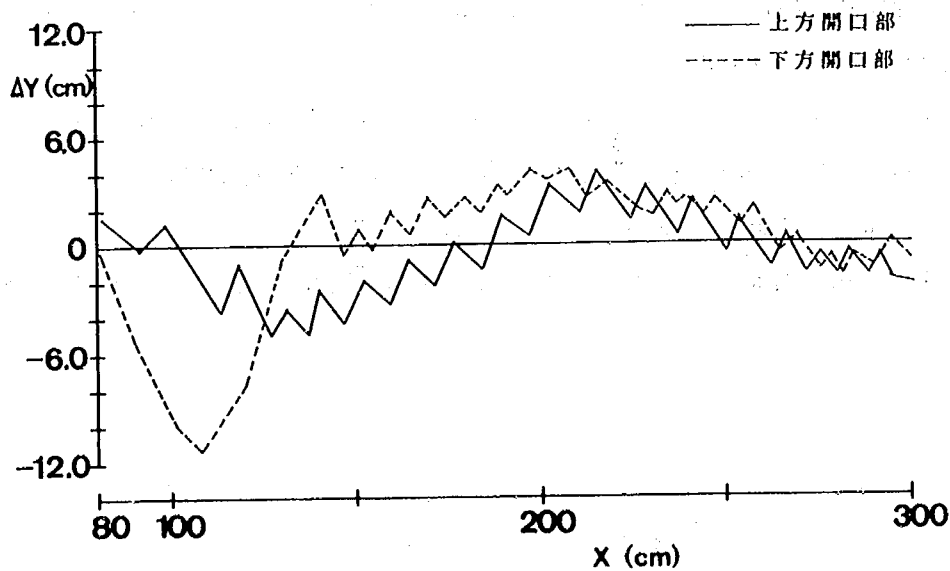


図 11.15 岸沖方向の初期形状に対する地形変化量
($T = 2.0 \text{ sec}$, $H = 12 \text{ cm}$)

11.4 ま と め

本研究により得られた結果をまとめると次のようである。

- ① 開口部位置が上方の場合の反射率 K_R は、下方の場合の 1.2 倍程度となる。しかし反射率の目標 $K_R \leq 0.5$ は満足している。
- ② 透過率 K_T は、 $H/L \leq 0.02$ の場合、上方開口部の場合が大きくなる。しかし $H/L > 0.02$ のとき開口部位置によりほとんど変化せず、全体的に透過率の目標値 $K_T \leq 0.6$ を満たす。
- ③ 前面開口部位置が洗掘に与える影響は大きい。まず、開口部位置が上方のときは堤内から上向きの噴き出し流れが生ずる。この流れは洗掘に対し与える影響はほとんどない。しかし開口部位置が下方のとき、堤内からは下向き流れが生じ、この流れは堤前面地形に局所洗掘を引き起こした。
- ④ 堤岸側地形においては堤からの落ち込み流れや透過波による地形変化は全く生じない。
- ⑤ 開口部からの流速は噴き出し流れが卓越する。さらにこの噴き出し流速は下方開口部の方が速く、洗掘に与える影響が大きい。

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(2)，土木研究所資料，第 2510 号，pp. 109～124，1987.
- 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，No 248，24 p.，1976.
- 3) 入江 功・近藤隆道・赤石正広・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 350～354，1984.
- 4) 土木学会編：“水理公式集（昭和60年度版）” p. 221，1985.
- 5) 宇多高明・小俣 篤・山本幸次：駿河海岸安定化手法調査報告書，土木研究所資料 2285 号，p. 67，1986.

図表一覧

- 図 11.1 斜板消波潜堤概念図
図 11.2 流況実験，洗掘実験の装置
図 11.3 斜板消波潜堤模型
図 11.4 流況測定用タフト位置図

第12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検討

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)		山本	幸次
	鉄 構 技 術 部	中山	種清
	建 設 技 術 部	飯村	修
	建設工学研究室	喜田	浩
	建 設 技 術 部	柳本	泰伴
	設 計 技 術 室	北村	卓也
	技 術 開 発 部	荻野	秀雄
	水 理 研 究 室	堺	和彦
	材料構造研究室	田淵	博
	設 計 部	本山	喜章

12.1 実験の目的

本研究は、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、前報¹⁾に引き続き各種モデルの消波効果及び作用波力等を明らかにするものである。

12.2 実験概要

実験では、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用いて、構造物の透過率、反射率及び構造物に作用する波圧、波力を測定した。実験モデルは、単純な円筒型のセル体を適当な間隔で一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、遊水タイプ、クロスホローケーソンタイプの3通りとした。

対象となるセル式海域制御構造物では、構造物によって生じる波は平面的な広がりをもつ。そこで実海域に近い条件となるよう平面水槽において実験を実施した。

12.3 実験方法と実験条件

実験は、建設省土木研究所水理共同実験棟内の平面水槽で行った。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12.1に示す仮設床を設け、造波板から1.75 mの区間は水平床、そこから2 mを勾配1/10の一樣斜面とし、さらにこれより6.5 mを水平床とした。また水平床より先5.25 mは勾配1/15の一樣斜面とした。実験の縮尺は1/50とし、実物と模型のスケールは表12.1の通りとした。

波浪条件を表12.2に示す。なお、予備実験の結果よりこの表に示された波高が得られるよう造波機のストロークを設定したが、実験時には模型と造波板間での多重反射により、これより多少大きな波高が生じている。

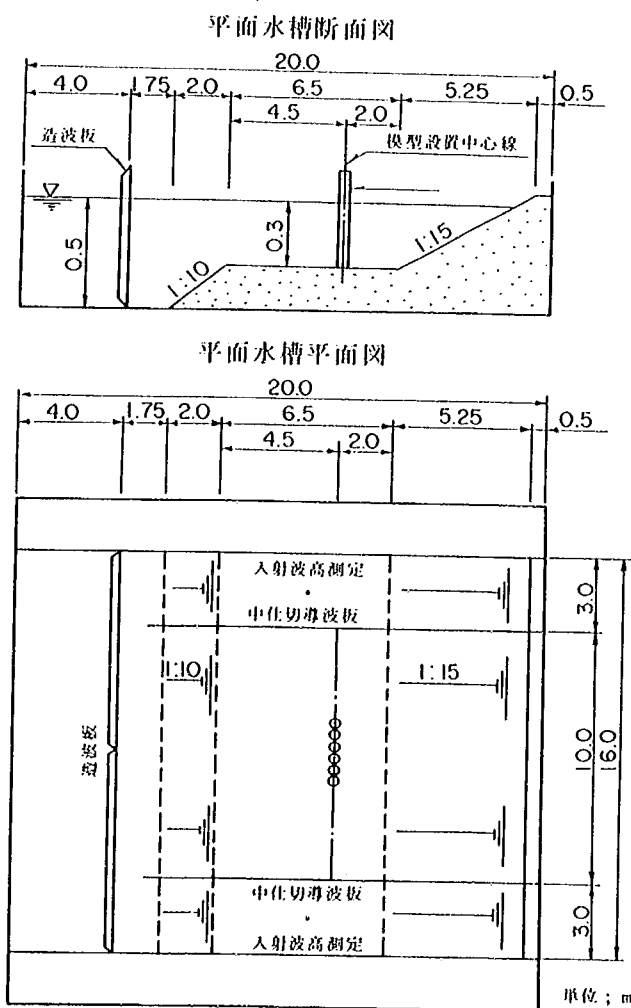


図 12.1 模型海浜形状

表 12.1 実験スケール

項 目		実 物	模型 (1 / 50)
セル 直 径 (D)		18.5 m	0.370 m
クロスホローケー ソン寸法	全長 (E)	9.6 m	0.193 m
	全幅 (Ft)	17.8 m	0.356 m
	全高 (Ht)	11.4 m	0.228 m
水 深 (h)		15.0 m	0.300 m

E, Ft, Ht : 図 12.5 参照

表 1 2.2 波浪条件

波 No.	波 高 H (cm)	周 期 T(sec)	波 長 L (cm)	波形勾配 H/L	相対水深 h/L
1	2	0.85	106	0.019	0.283
2	2	1.13	163	0.012	0.184
3	4			0.025	
4	2	1.34	204	0.0098	0.147
5	4			0.020	
6	8			0.039	
7	12			0.059	
8	4	1.70	271	0.015	0.111
9	8			0.030	
10	12			0.044	
11	8	1.98	322	0.025	0.093
12	12			0.037	

実験を行った構造形式は、基本タイプ、遊水タイプ、クロスホローケーソンタイプの3通りであり、各構造形式の概略形状を図 12.2 に示す。配置形式は、各構造形式ともに図 12.3 に示す通り1列配置とした。各構造形式の概要と構造条件は、以下の通りである。

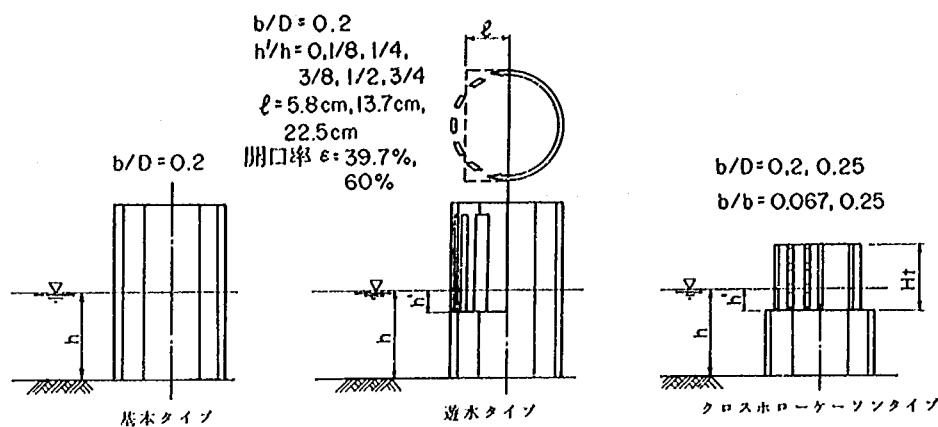


図 12.2 セル形状一覧

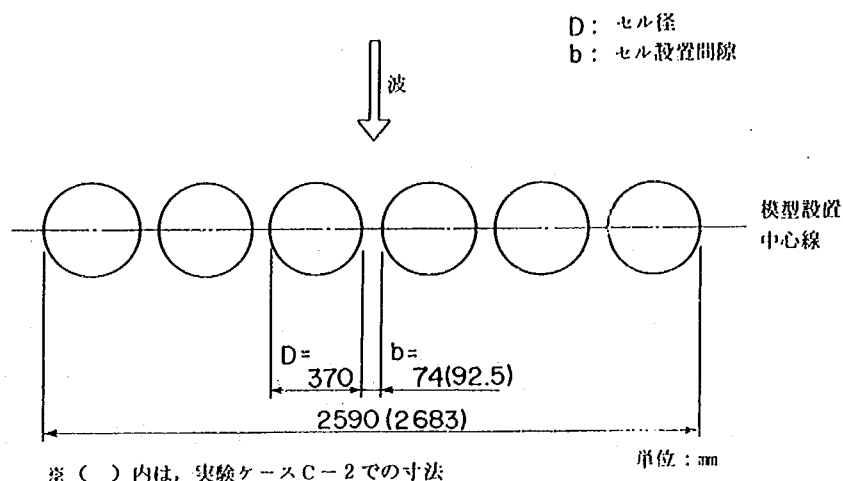


図 12.3 配置形式

(1) 基本タイプ

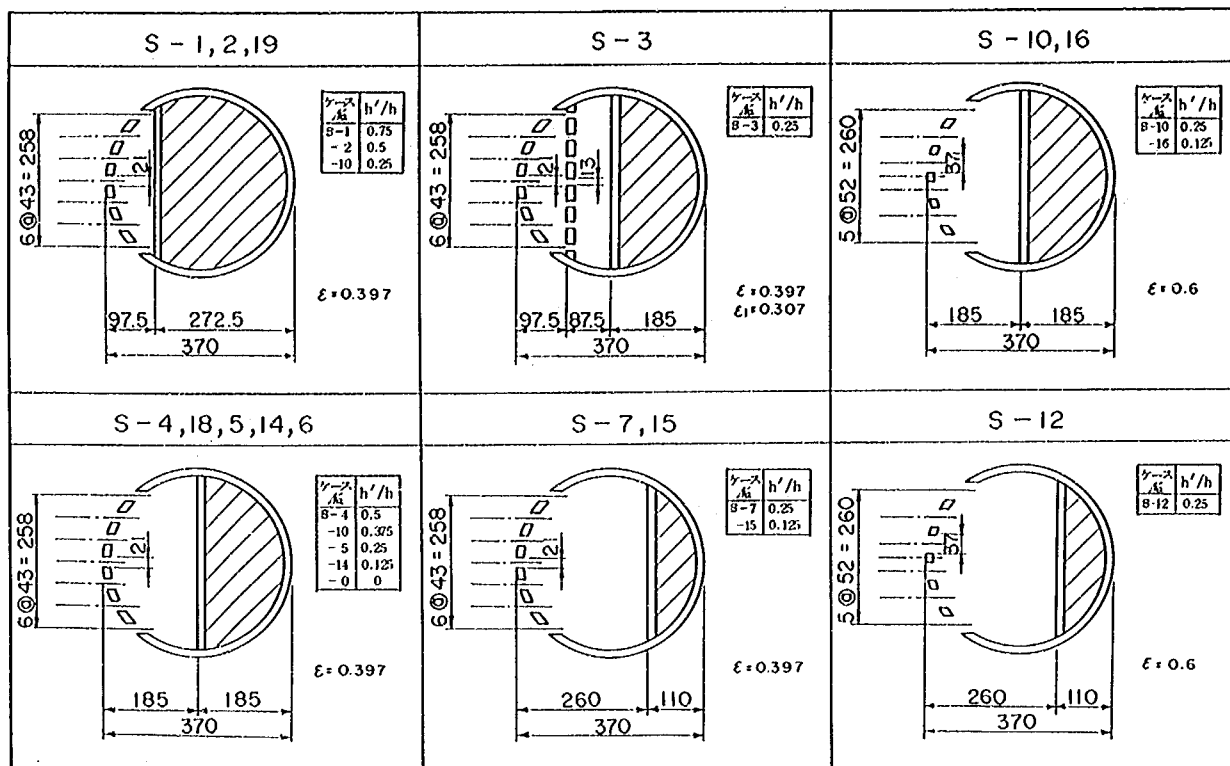
円筒形の模型を、径の 0.2 倍の間隙をもって 1 列に配置したものであり、他の構造形式の消波性能を評価するためのものである。構造条件諸元を表 12.3 に示す。

表 12.3 基本タイプ構造条件

実験ケースNo.	セル径 D (cm)	セル間隙 b (cm)	セル間隙比 b/D
F	37.0	7.4	0.2

(2) 遊水タイプ

セル体の一部を遊水室とし、遊水室前壁を縦スリット壁としたものであり、水粒子がスリット壁を通過を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図る構造である²⁾。本構造を用いた実験では、遊水室の水深、奥行及びスリットの開口率が、消波性能におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。構造条件諸元を表 12.4、図 12.4 に示す。これらのうち S-3 は 2 重スリット構造であり、遊水室前壁と隔壁との間に縦スリット壁を有する。



※スリット部材厚はすべて10mm

図 12.4 遊水タイプ構造様式

(3) クロスホローケーソンタイプ

セル上にクロスホローケーソンを設置したものであり、クロスホローケーソンの消波効果を利用した構造である。本構造を用いた実験では、クロスホローケーソン部の水深及びセル設置間隔が、消波性能におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。構造条件諸元は表 12.5，図 12.5 に示す。

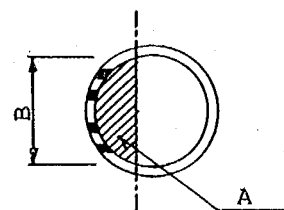
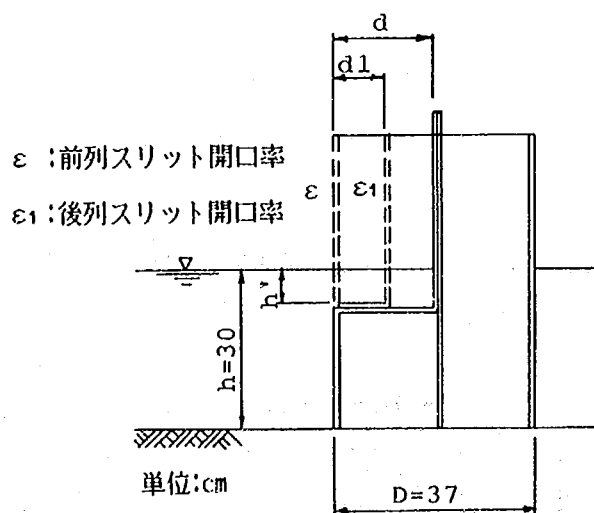
表 12.5 クロスホローケーソンタイプ構造条件

実験ケースNo.	h' (cm)	h'/h	b (cm)	b/D	bc (cm)
C-1	2.0	0.067	7.4	0.20	8.8
C-2			9.25	0.25	10.65
C-3	7.5	0.25	7.4	0.20	8.8

表 12.4 遊水タイプ構造条件

実験ケースNo.	b/D	前 列 ス リ ッ ト				h'/h	記 事
		ϵ	d/D	ℓ (cm)	ℓ/h		
S-1	0.2		0.25	5.8	0.193	0.75	
S-2						0.50	
S-19						0.25	
S-3		0.397	0.50	13.7	0.458	0.25	S-3 : 2重スリット $\epsilon_1 = 0.306$ $d_1/D = 0.25$
S-4						0.50	
S-18						0.375	
S-5						0.25	
S-14						0.125	
S-6						0.0	
S-7		0.75	22.5	0.608		0.25	
S-15						0.125	
S-10		0.60	0.50	13.7	0.458	0.25	
S-16						0.125	
S-12			0.75	22.5	0.608	0.125	

注) ϵ , ϵ_1 : 開口率
 ℓ : 遊水室の換算奥行



遊水室換算奥行 $\ell = A/B$

A : 遊水室の断面積

B : 遊水室の最大幅

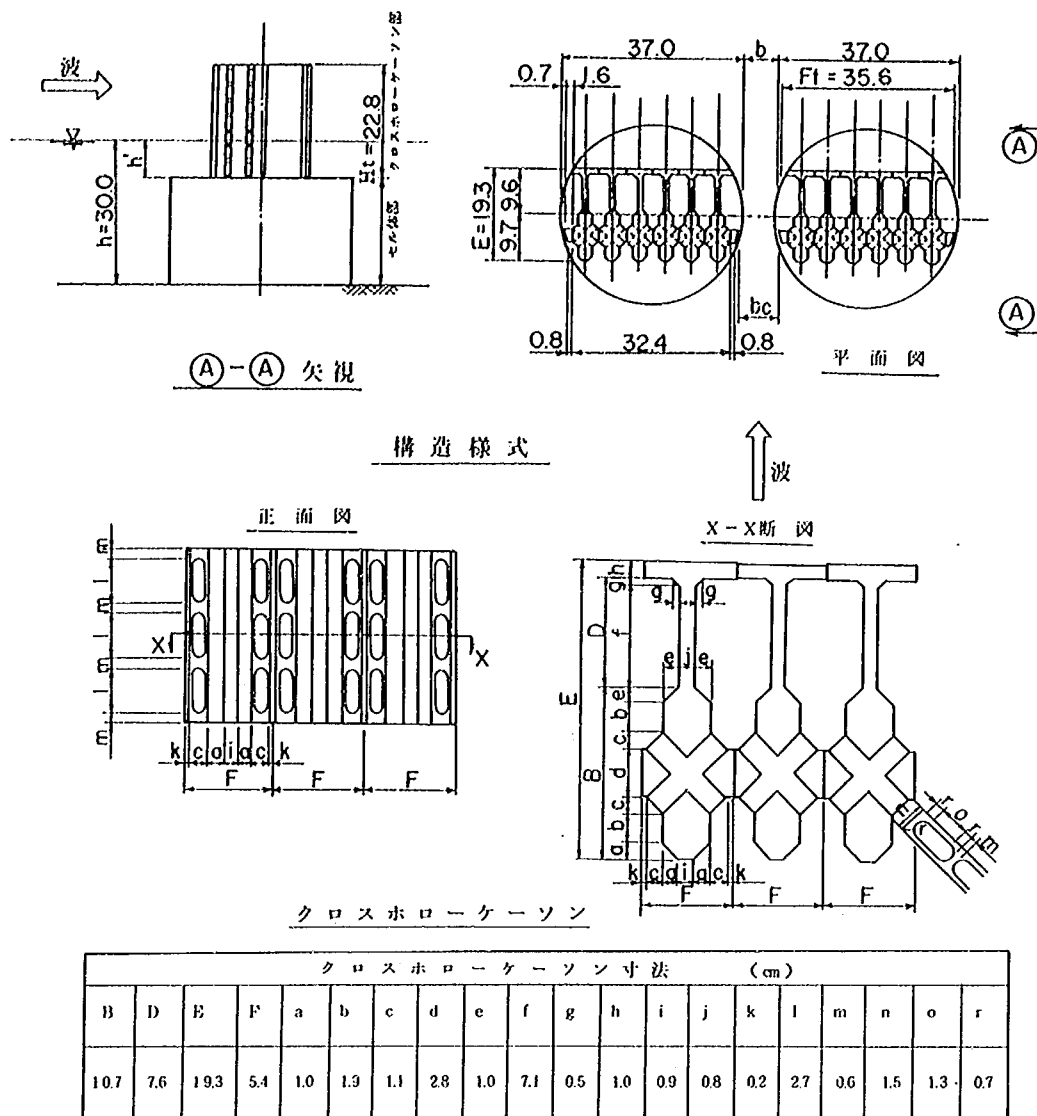


図 12.5 クロスホローケーソンタイプ構造様式

12.4 測定方法

波高、全波力及び局部波圧を以下の方法で測定した。測定値のサンプリング間隔は、周期 $T = 0.85$ 秒の条件で0.03秒、その他の条件で0.05秒とした。

(1) 波高測定

入・反射波高及び透過波高の測定位置を図 12.6、表 12.6 に、入・反射波高測定要領を図 12.7に示す。表 12.6 は図 12.6における諸元を示すものである。入・反射

表 12.6 測定位置諸元

項 目	周 期 T (sec)					記 事
	0.85	1.13	1.34	1.70	1.98	
ℓ_1 (cm)	52.0	52.0	52.0	60.0	60.0	
ℓ_2 (cm)	13.3	20.4	25.5	33.9	40.3	波長/8

波高は図 12.7 に示すように走行台車を用いて測定した。台車には図 12.6 に示す 2 測線上に各々 2 台の波高計を設置した。測定範囲は、堤体中心線より沖側 25 cm の位置から延長 3.0 m の範囲とし、台車を走行させて往路と復路の 2 回測定を行った。また台車の走行速度は 5 cm/秒とした。入・反射波の分

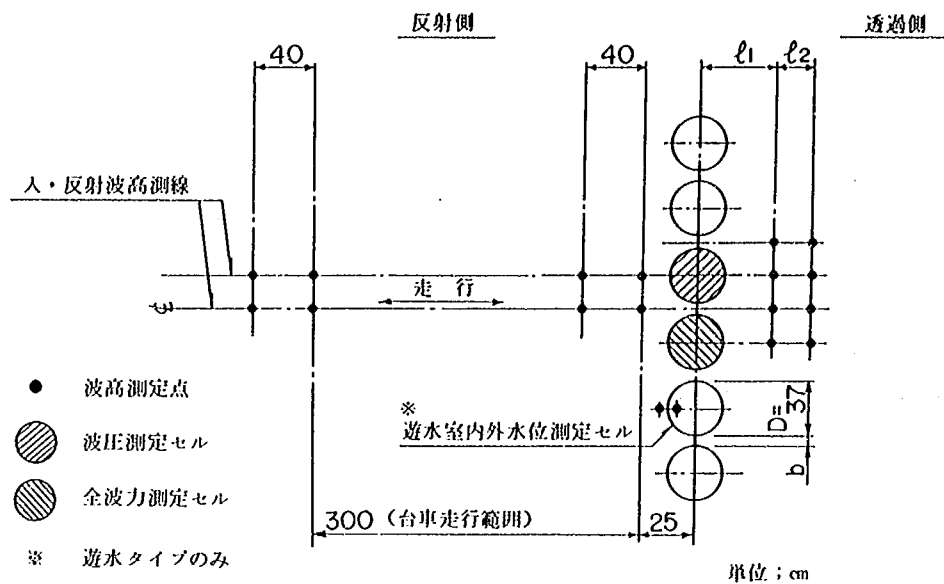


図 12.6 波高測定位置

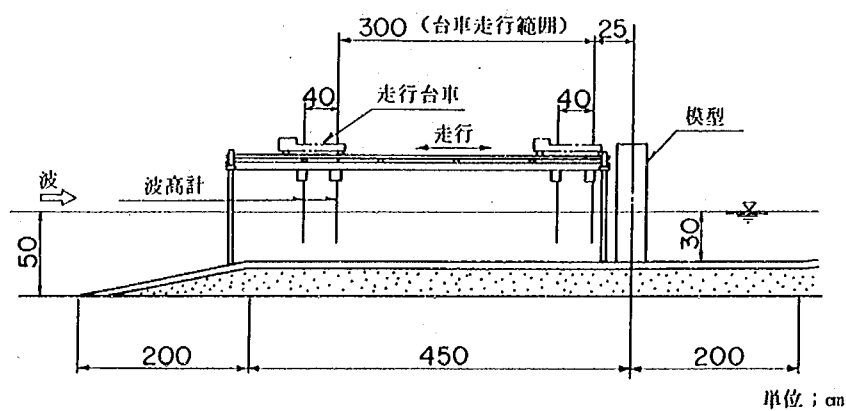


図 12.7 入反射波高測定要領

離は Healy の方法を用いて行った。その際の最大波高、最小波高には、各波高計ごとに最大値、最小値を読み取り、それぞれの平均値を用いた。この場合、堤体付近での乱れた波の影響を除くため、堤体中心線より入射波長の 1/4 以上離れた位置での値を用いた。

透過波高としては、図 12.6 に示す模型背後の 8 測点で得られた値の平均値を用いた。測点は構造物近傍での擾乱及び堤体外側からの回折波の影響を考慮し、表 12.6 に示した位置に設定した。

反射率 K_R 及び透過率 K_T は、得られた入射波高 H_I 、反射波高 H_R 、透過波高 H_T より、 $K_R = H_R / H_I$ 、 $K_T = H_T / H_I$ として算定した。また、遊水タイプについては、消波機構推定のため図 12.8 に示す測定位置において、遊水室前面水位と遊水室内水位の同時測定を行った。

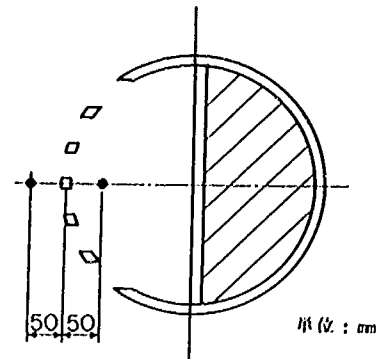


図 12.8 遊水室内外水位測定位置

(2) 全波力測定

全波力の測定方法を図 12.9 に示す。仮設床底面に設けたピット内に防水型の 3 分力検出器を設置し、治具を介して模型を支持することにより、セル体に作用する水平波力とモーメントを測定した。

また、模型固定治具底面に波圧計を 2 個取り付け、セル底面に作用する揚圧力を測定し、3 分力検出器によるモーメント測定値から揚圧力によるモーメントを差し引き、水平力によるモーメントを算出した。

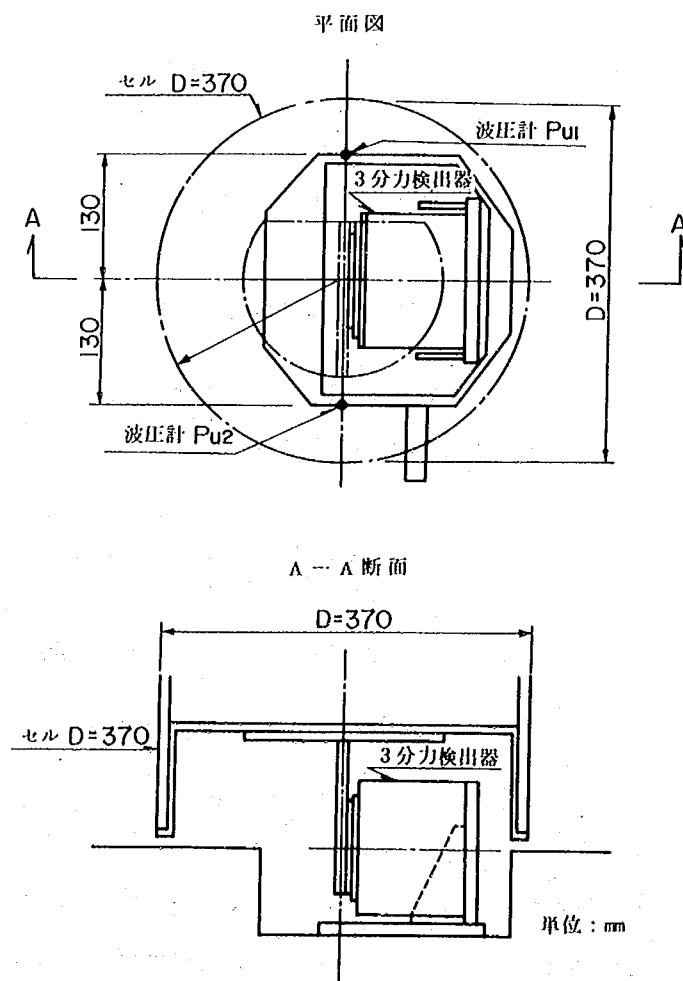


図 12.9 全波力測定要領

(3) 局部波圧測定

遊水タイプ、クロスホローケーソンタイプの各部材に作用する波圧を求めるため、代表的な実験ケースについて局部波圧の測定を行った。表 12.7 に局部波圧測定を行った実験ケースを、図 12.10, 12.11 に波圧測定位置の例を示す。局部波圧測定位置は、遊水タイプ（図 12.10）では、スリット部及び隔壁部とし、クロスホローケーソンタイプ（図 12.11）では、後壁部とした。

表 12.7 局部波圧測定実験ケース

構 造 型 式	局部波圧測定実験ケース
遊 水 タ イ プ	S - 1, 3, 4, 5, 7, 10,
クロスホローケーソンタイプ	C - 3

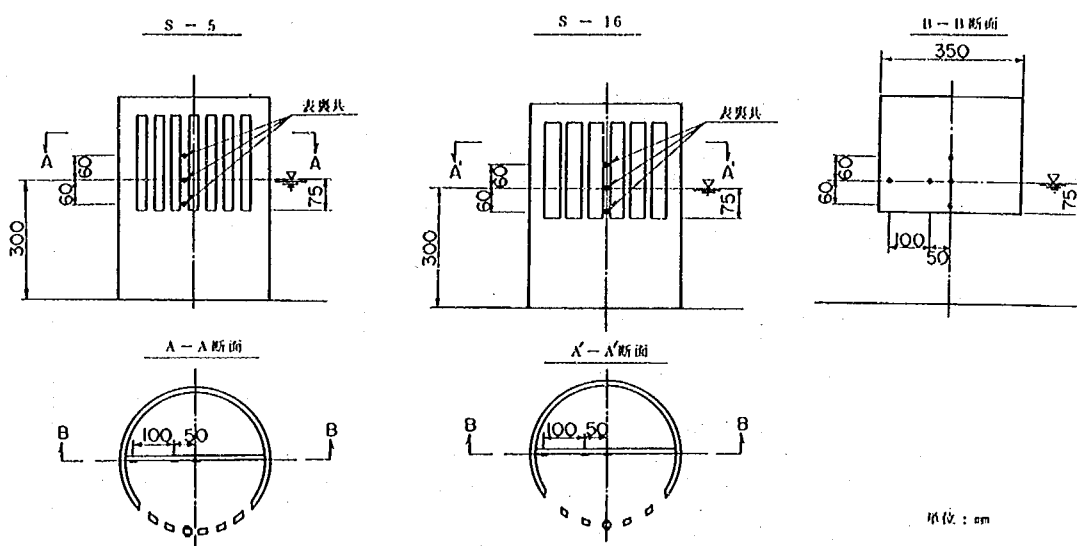


図 12.10 局部波圧測定位置（遊水タイプ，S - 5，S - 16）

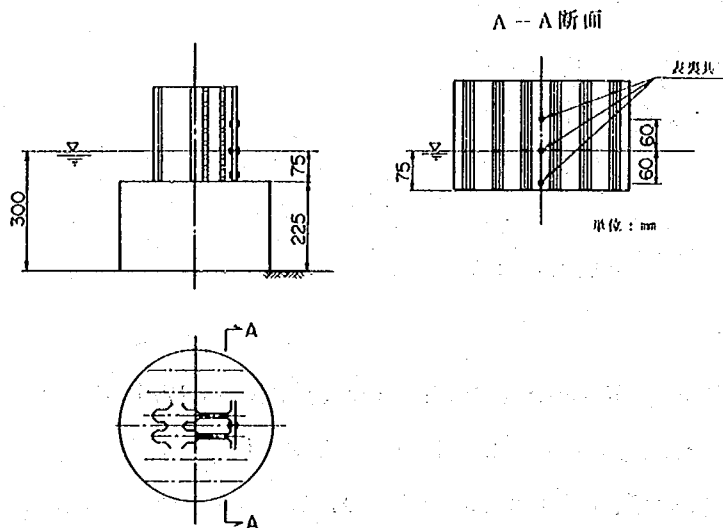


図 12.11 局部波圧測定位置（クロスホローケーソンタイプ，C - 3）

12.5 実験結果

12.5.1 反射率 (K_R)、透過率 (K_T) 及びエネルギー損失率 (K_L^2)

測定値の整理にあたり、透過波高測定及び波力・波圧測定結果はすべて10波当りの平均とした。

全ケースの K_T , K_R 測定結果を表 12.8 に示す。これらのうち消波性能のめやすである $K_R \leq 0.5$, $K_T \leq 0.6$ ¹⁾ を概ね満たすものは、S - 5, S - 16, S - 18の3ケースである。

表 12.8 反射率, 透過率測定結果

実験ケース		h'/h	反射率 (K_R)	透過率 (K_T)	評価	記 事
基本タイプ	F	—	0.42 ~ 0.70	0.36 ~ 0.68		
遊水タイプ	S - 1	0.75	0.41 ~ 0.69	0.33 ~ 0.79		
	S - 2	0.50	0.36 ~ 0.69	0.30 ~ 0.52		
	S - 19	0.25	0.40 ~ 0.63	0.28 ~ 0.59		
	S - 3	0.25	0.31 ~ 0.49	0.17 ~ 0.76		S - 5 の 2 重スリット
	S - 4	0.50	0.32 ~ 0.58	0.21 ~ 0.65		
	S - 18	0.375	0.21 ~ 0.52	0.24 ~ 0.58	○	
	S - 5	0.25	0.22 ~ 0.46	0.18 ~ 0.59	○	
	S - 14	0.125	0.29 ~ 0.55	0.26 ~ 0.74		
	S - 6	0.0	0.29 ~ 0.65	0.36 ~ 0.61		
	S - 7	0.25	0.28 ~ 0.47	0.27 ~ 0.75		
	S - 15	0.125	0.29 ~ 0.62	0.30 ~ 0.79		
	S - 10	0.25	0.21 ~ 0.46	0.17 ~ 0.75		
	S - 16	0.125	0.23 ~ 0.49	0.24 ~ 0.56	○	
	S - 12	0.25	0.18 ~ 0.41	0.30 ~ 0.66		
クロスホロー ケーソン タイプ	C - 1	0.067	0.30 ~ 0.62	0.23 ~ 0.53		
	C - 2	0.067	0.31 ~ 0.62	0.30 ~ 0.56		
	C - 3	0.25	0.26 ~ 0.45	0.25 ~ 0.85		

注) 評価の基準: $K_R \leq 0.5$, $K_T \leq 0.6$

(1) 基本タイプ

基本タイプにおける K_T , K_R と相対水深 h/L との関係を図 12.12 に示す。これによれば波形勾配 H/L のほぼ同一な範囲でみると、 h/L が大きくなるには従い K_T は減少、 K_R は増加する傾向がある。今回の実験では水深 h はすべて同一であり、従ってこの傾向は波長 L すなわち周期 T との関係とみることができる。すなわち、水深一定の条件の下では周期が短いほど K_T は減少し、 K_R は増

加する傾向を持つ。消波性能のめやすを $K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$ とした場合、周期の長い波に対しては K_T が、周期の短い波に対しては K_R がこの条件を満たしていない。

次に K_L^2 と h/L との関係を図12.13に示す。なお、 K_L^2 は次式により算出した。

$$K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad (12.1)$$

これによれば、 K_L^2 は h/L に依存しないことがわかる。 $K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$ を満たすためには K_L^2 が0.4以上となる必要があるが基本タイプではこの条件を満たさない場合が多い。

(2) 遊水タイプ

図12.14, 12.15は、遊水タイプの消波性能と波長 L との関係をみるために、S-3(2重スリット)を除くすべての遊水タイプの K_T , K_R と h/L との関係を示したものである。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。これらのグラフでは遊水室諸元の異なる多くの実験結果を同時にプロットしているため、ばらつきが大きいものの次のことがわかる。

まず、 K_T は、ほぼ全ての実験ケースで、 h/L が大きくなるに従い減少する傾向を示している。このことから遊水室の諸元にかかわらず、波長の短いほど K_T が小さくなることがわかる。この傾向は基本タイプと同様であるが、 K_T の大きさは遊水室諸元の影響により基本タイプと異なるケースがある。一方、遊水タイプの K_R と h/L との関係(図12.15参照)は、各実験ケースごとに差があり、遊水室諸元による影響が大きい。 K_R を基本タイプと比較すると、遊水タイプの値は基本タイプより小さく、遊水室の存在により反射率が低減されていることがわかる。

図12.16は K_L^2 と h/L との関係を示す。 K_L^2 は h/L が大きくなるに従って増加する傾向にあることがわかる。すなわち遊水タイプの消波効果は、周期が短いほど大きいといえる。また、 K_L^2 は、遊水室の消波効果により、基本タイプと比べ概ね大きくなっている。

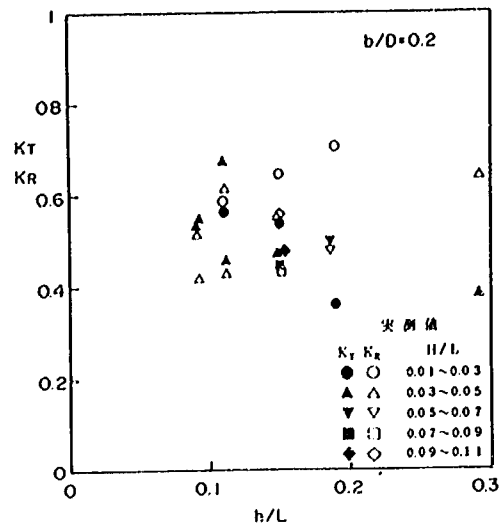


図12.12 K_T, K_R と h/L の関係(基本タイプ, $b/D=0.2$)

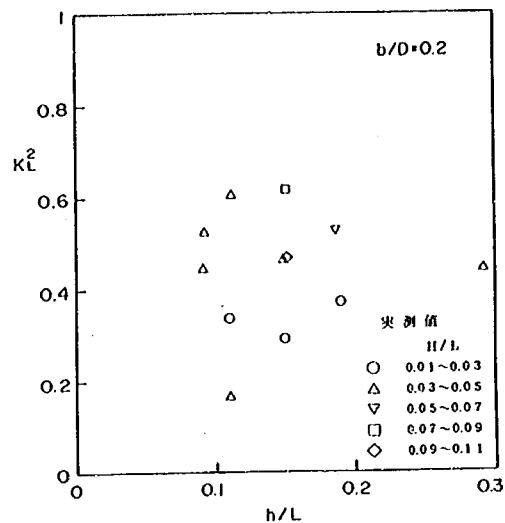


図12.13 K_L^2 と h/L の関係(基本タイプ, $b/D=0.2$)

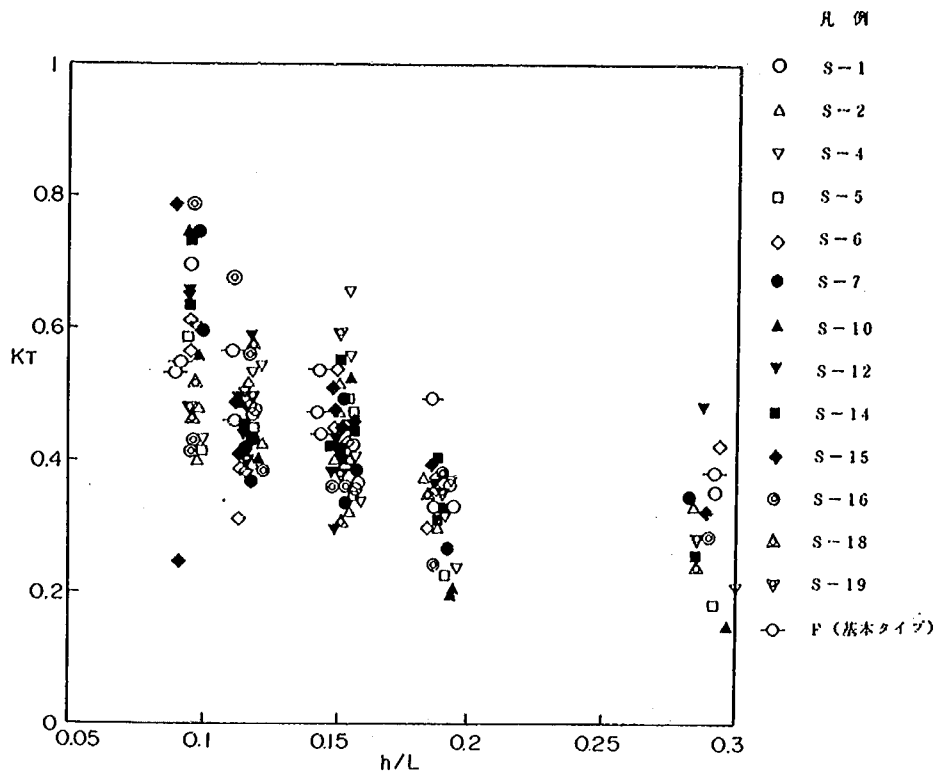


図 12.14 K_T と h/L の関係 (遊水タイプ)

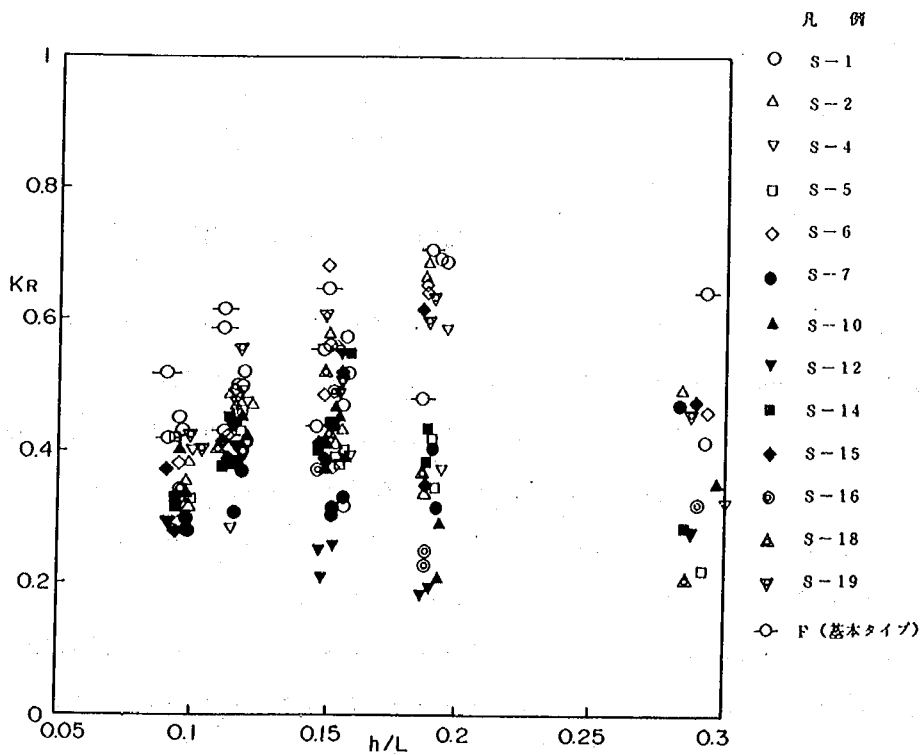


図 12.15 K_R と h/L の関係 (遊水タイプ)

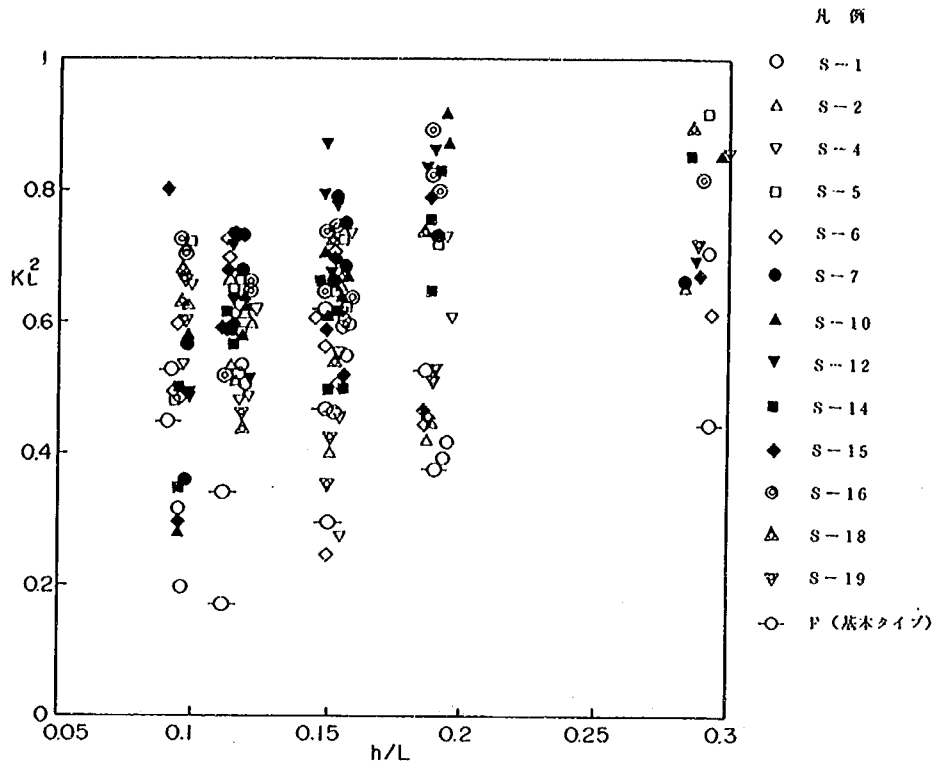


図 12.16 K_L^2 と h/L の関係 (遊水タイプ)

消波性能と h/L との関係をより詳細にみるため、 $K_T \leq 0.6$ 、 $K_R \leq 0.5$ の条件を満たしている S-5 の K_T 、 K_R を図 12.17 に示す。 K_T は基本タイプと同様、 h/L が大きくなるに従って減少している。一方、 K_R は、 h/L が小さい範囲 ($h/L \leq 0.2$) では明確ではないが、 $h/L \geq 0.2$ においては、基本タイプとは逆に h/L が大きくなるに従って減少していることがわかる。

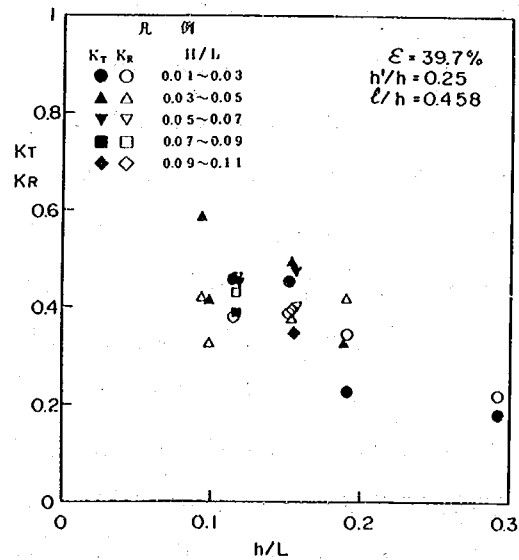


図 12.17 K_T と K_R と h/L の関係 (遊水タイプ, S-5)

図 12.18 は 2 重スリットが K_R に与える影響を検討するため、2 重スリットを有する S-3 と、1 重スリット構造で同一の遊水室諸元を有する S-5 の K_R を、横軸に h/L をとって比較したものである。この図より S-3 では、 h/L が小さい場合を除いて、S-5 に比べ K_R が大きくなっていることがわかる。このことから 2 重スリットを設けても反射率を改善できないといえる。

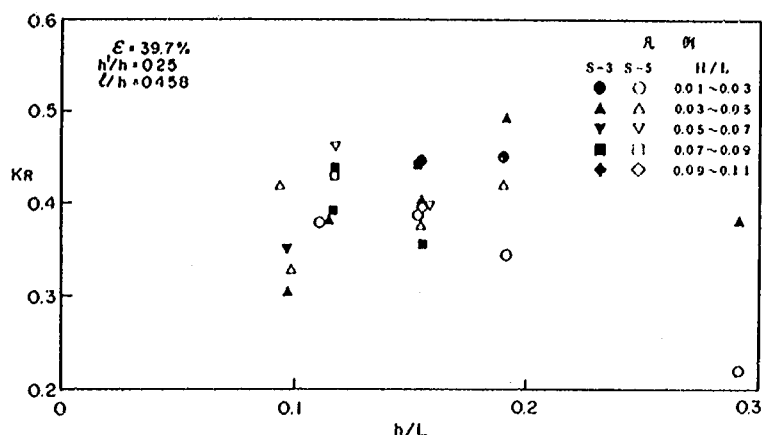


図 12.18 K_R の 2 重スリットによる影響 (遊水タイプ, S-5: 1 重スリット, S-3: 2 重スリット)

(3) クロスホローケーソンタイプ

すべてのクロスホローケーソンタイプの K_T , K_R と h/L との関係を図 12.19 に示す。図には比較のため基本タイプの結果も合せて表示した。これによれば, K_T は基本タイプと同様, h/L が大きくなるに従って減少する傾向があるが, K_R と h/L との関係は明確ではない。 K_T , K_R の値をみると C-1, C-2 では $K_T \leq 0.6$ を満たしているものの, 一部で $K_R \leq 0.5$ を満たしておらず, 逆に, C-3 では $K_R \leq 0.5$ であるものの, $K_T > 0.6$ となる場合がある。従ってこの条件を満たすためには, b/D を 0.2 としてクロスホローケーソン部深さ h' を C-1 ($h'/h=0.067$) と C-3 ($h'/h=0.25$) の中間とするか, あるいは $h'/h=0.067$ として b/D を C-2 ($b/D=0.25$) 以上とする必要がある。セル間隙 b の違いによる影響をみるため C-1 ($b/D=0.2$) と C-2 ($b/D=0.25$) を比較すると, K_T は C-2 が大きく K_R は C-1 が大きい傾向がみられるが, その差はあまり顕著ではない。すなわちこの程度のセル間隙の差は有意ではないといえる。またクロスホローケーソンの部深さ h' の違いによる影響をみるため C-1 ($h'/h=0.067$) と C-3 ($h'/h=0.25$) を比較すると, K_T では C-3 が大きくなっており, 特に h/L の小さい場合にこの傾向が著しい。これはクロスホローケーソン間の間隙がセル間と比べ若干大きくなっているため, クロスホローケーソン部深さが大きい C-3 では C-1 に比べ全体の間隙が大きいこと, 及びセル間隙とクロスホローケーソン間隙との縮流による消波効果が異なることによるものと推定される。一方, K_R に関しては C-1 が大きく, 特に $h/L=0.19$ 前後における差が大きい。基本タイプの消波性能と比較すると, セル間隙の等しい C-1, C-3 における K_T , K_R は概ね基本タイプ以下となっているが, C-3 における $h/L=0.1$ 前後の K_T が基本タイプより大きな値となっている。

図 12.20 は K_L^2 と h/L との関係を示しており, h/L が大きくなるに従い K_L^2 が大きくなる傾向がみられる。基本タイプと比較すると, K_L^2 は基本タイプより概ね大きな値となっており, 特に h/L が大きくなるとその差も大きくなる。従って, クロスホローケーソンタイプの消波効果は h/L が大きいほど大きいといえる。すなわち, 水深一定の条件の下では短周期波の場合に消波効果が高いこ

となる。

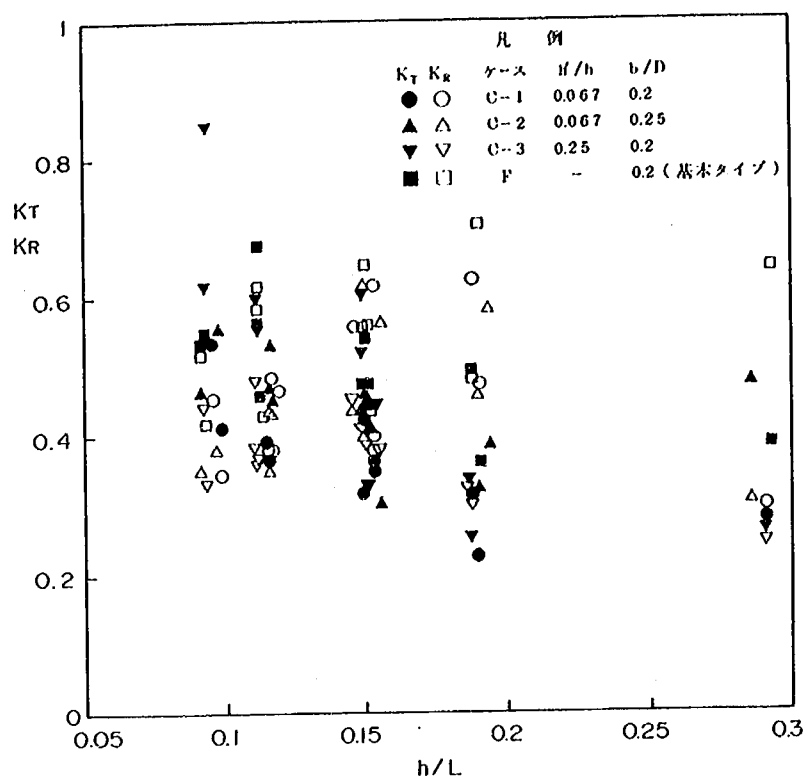


図 12.19 K_T, K_R と h/L の関係 (クロスホローケーソンタイプ)

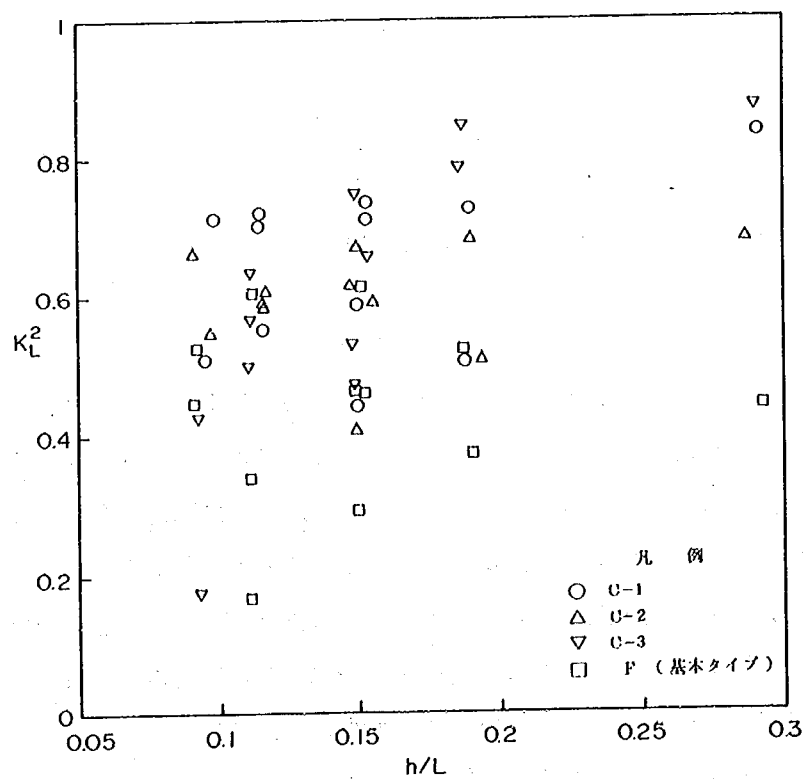


図 12.20 K_L^2 と h/L の関係 (クロスホローケーソンタイプ)

12. 5. 2 基本タイプの透過率, 反射率に関する検討

基本タイプの K_T , K_R の実験結果と, 物体周りの回折を考慮した速度ポテンシャル理論に基づいて, Green 関数を用いる方法³⁾ による解析値との比較を行う。図 12. 21 に K_T , K_R の解析結果と実験結果を示す。なお, この解析では波の取扱いに微小振幅波理論を用いているため, 波高の変化に対する非線形効果は含まれていない。従って, 波高による K_T , K_R の変化は生じない。また, 基本タイプの消波性能に関しては, セル径と波長の比 D/L が重要な要因と考えられるため, この図では横軸を D/L としている。ただし, 実験, 解析ともセル径を一定としており, D/L は周期のみのパラメータとなっている。図 12. 21 より, K_T に関しては解析値と実験値が比較的一致しているものの, K_R に関しては解析値が実験値に比べ大きくなっている。この理由の 1 つとして, 解析ではエネルギー損失が生じないことを前提としているのに対し, 実際には前節で述べたように $K_L^2 = 0.2 \sim 0.6$ 程度のエネルギー損失が生じていることがあげられる。

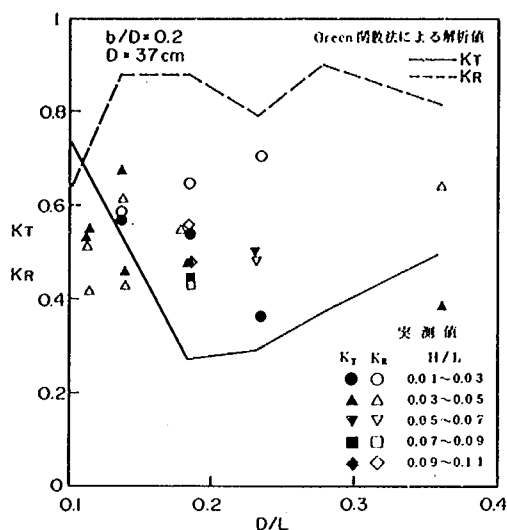


図 12. 21 K_T , K_R の実測値と解析値 (基本タイプ)

12. 5. 3 遊水タイプ構造体の反射率に及ぼす各種要因の検討

微小振幅波理論を用い, エネルギー損失項を擬非線形として扱った谷本等の方法⁴⁾ により, 遊水タイプ構造体の K_R に及ぼす各種要因について検討を加える。なお, 谷本等の方法は連続する直立ケーソンを対象としたものであり, 鋼板セル式海域制御構造物のように断続的に間隙を有し, かつ円筒体からなる構造物とは基本的に異なるため, 反射率自体をこの方法で求めることはできない。しかし, 各種要因の及ぼす影響が, 定性的にでも把握可能であれば, 実際の構造物設計において最も効果的な構造諸元の推定に活用することができる。従ってここでは, 各パラメータが反射率に与える影響につき, 谷本等の方法による解析値と実験結果の定性的な比較を行い, その妥当性を検討した。

谷本等によれば縦スリットケーソンの反射率を支配する要素は, 波の条件として h/L , 入射波の H/L , 構造条件としてスリット壁の開口率 ϵ 及び前面水深に対する遊水室内水深, 遊水室奥行, スリッ

ト厚さのそれぞれの比 h'/h , l/h , l'/h であって、そのうち主要なものは h/L , h'/h , ϵ , l/h であるとされている。ここでは H/L , h/L , h'/h , l/h , ϵ の各パラメータが反射率に与える影響について検討する。

図 12.22 は、波高の変化が K_R に与える影響を検討するため、S-5 の実験条件 ($\epsilon = 0.397$, $h'/h = 0.25$, $l/h = 0.458$) において求めた K_R の解析値と実験値を、横軸に H/L をとって示したものである。解析値では極小値を持つ変化が認められるが、実験値では同一周期において3種類以上波高を変化させているものが $h/L = 0.115 \sim 0.118$ 及び $0.153 \sim 0.156$ の2ケースしかなく、いずれの H/L も、解析において極小値を生ずる H/L の範囲外となっていることもあって、極小値は認められない。また実験では解析値と比べ、 H/L による K_R の変化が小さく、波高の影響は小さいと考えられる。

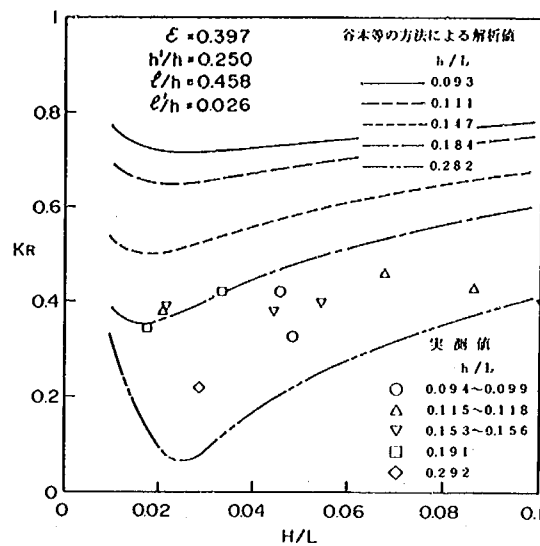


図 12.22 波高 H による K_R の変化

図 12.23 は、周期の変化が K_R に与える影響を知るために、 K_R の解析値と実験値を比較したものである。 h/L が $0.3 \sim 0.4$ 以下において、解析値は h/L が大きくなるとともに減少するのに対し、実験値も $0.2 \sim 0.3$ において解析値と同様の傾向を有している。遊水室を有しない基本タイプでは、 h/L が大きくなると K_R が増加する傾向を示したことから (図 12.12 参照)、S-5 においては、周期が短い場合において遊水室による反射率低減の効果が顕著に現れ、その結果 h/L が 0.2 以上において解析値と同様の傾向を示したと考えられる。

図 12.24 は、遊水室内水深の変化が K_R に与える影響を検討するため、 $\epsilon = 0.397$, $l/h = 0.458$ の条件の下で、 K_R の解析値と実験値を、横軸に h'/h をとって比較したものである。解析値では、 h/L にかかわらず、 $h'/h = 0.3$ 付近に極小値が存在する。一方、実験では、 $h/L = 0.147 \sim 0.3$ の場合において、解析値と同様、 $h'/h = 0.3$ 付近に極小値が存在するが、周期の長い $h/L = 0.094 \sim 0.1$ の場合には極小値が存在せず、 h'/h に依存しないことがわかる。このことは、前述の様に遊水

室の効果が h/L の大きな波に顕著に現れたことによるものと考えられる。

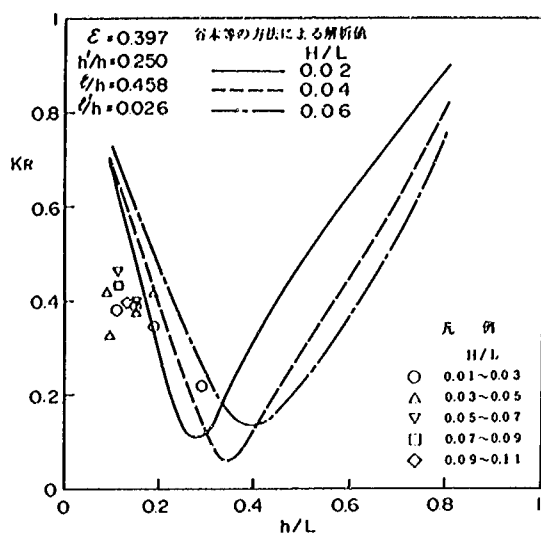


図 12.23 周期 T による K_R の変化

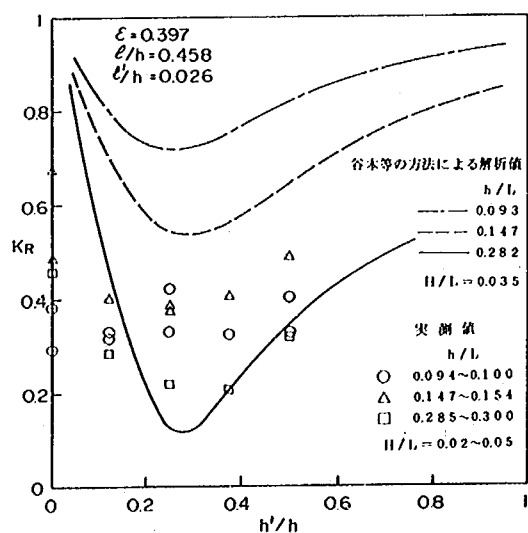


図 12.24 遊水室内水深 h' による K_R の変化

図 12.25 は、遊水室奥行の変化が K_R に与える影響を検討するため、 $\epsilon = 0.397$ 、 $h'/h = 0.25$ の条件の下で、 K_R の解析値と実験値を、横軸に ℓ/L_2 をとって比較したものである。ここで L_2 は遊水室内水深に対する波長である。解析値をみると $\ell/L_2 = 0.25$ において K_R が極小値をとっている。これはこの条件においてスリット部からの反射波と遊水室隔壁からの反射波が干渉し合い、打消しあっていることによる。一方、実験値は全て ℓ/L_2 が 0.25 以下であるため極小値は認められないものの、 ℓ/L_2 が

大きくなるに従って K_R が減少する傾向を示し、解析値と傾向が一致する。また、 h/L 、 H/L の違いによるばらつきは比較的小さく、 ℓ/L_2 が重要な要因であるといえる。遊水室による K_R 低減効果が、前述の様に周期の短い波において顕著に現れたのは、周期が短いほど ℓ/L_2 が 0.25 に近づき、位相差による消波効果が有効に働いたためと考えられる。

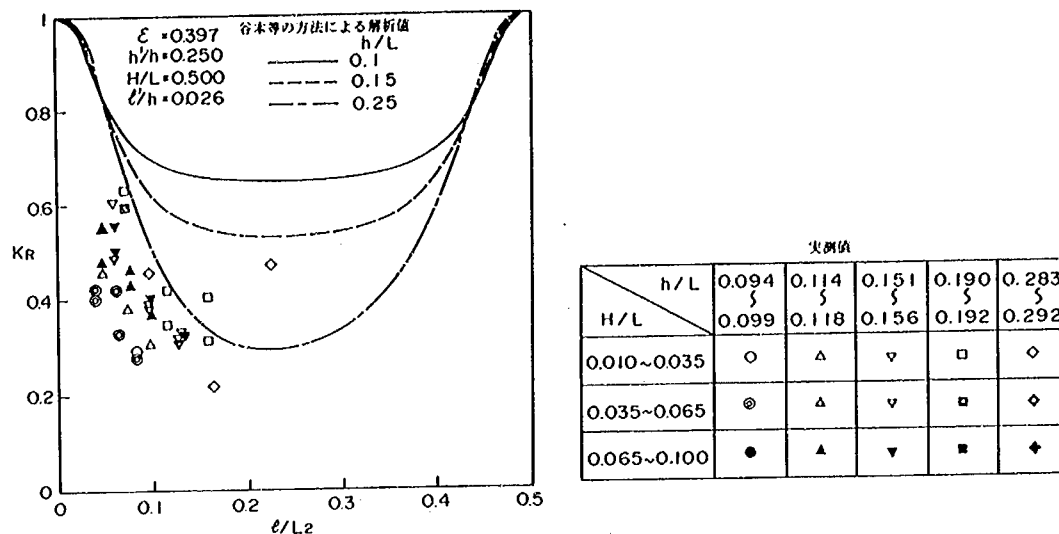


図 12.25 遊水室奥行 ℓ による K_R の変化

図 12.26 は、開口率 ε の変化が K_R に与える影響を検討するため、 $h'/h = 0.25$ 、 $\ell/h = 0.458$ の条件で、 K_R の解析値と実験値を、横軸に ε をとって比較したものである。解析値では $\varepsilon = 0.5$ 付近に極小値があることから、今回の実験において採用した $\varepsilon = 0.397$ 及び 0.6 は、最適開口率に近い値であったことがわかる。実験で得られた $\varepsilon = 0.397$ における K_R と $\varepsilon = 0.6$ における K_R とを比較すると、 $h/L = 0.292 \sim 0.297$ の条件において $\varepsilon = 0.6$ の場合の K_R が大きくなっているが、 $h/L = 0.094 \sim 0.154$ においてはほぼ同様の値となっている。このことは、解析値の示す傾向とほぼ一致している。

以上のように、遊水タイプ構造体の反射率に及ぼす各種要因の影響については、谷本等の方法により定性的な傾向の把握が可能であると考えられる。ただし、先に述べた通り、谷本等の理論には鋼板セル式海域制御構造物に適合しない部分があり、ここでの検討結果はあくまでも定性的な特性に関するものであって、実際に個々の構造物に対しその消波特性を明らかにするには、実験による検討が必要であると考えられる。

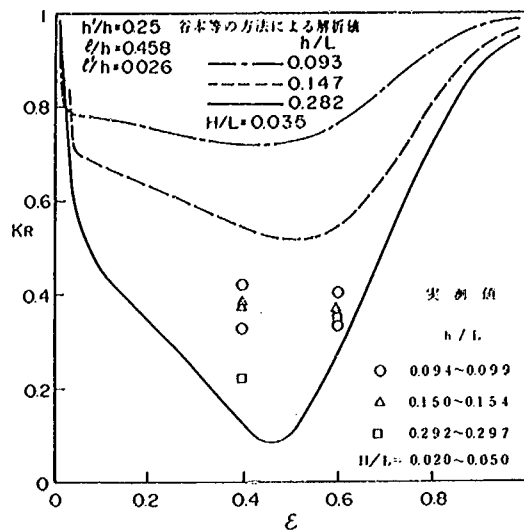


図 12.26 開口率 ϵ による K_R の変化

12.5.4 全波力の検討

3 分力検出器により測定したセル体全体に働く最大水平波力及び最大モーメントに関し、合田式⁵⁾による算定値との比較を行う。なお、モーメントの実験値は、セル体底面における波圧測定結果より算定した揚圧力によるモーメントを差し引き、水平波力のみによるモーメントに補正してある。また、合田波力の作用幅は構造物の波向方向投影幅とした。

図 12.27 に、基本タイプにおける最大水平波力及び最大モーメントを、合田式による算定値で無次元化した値（以下において、無次元波力・モーメントと称する）と波形勾配 H/L との関係を示す。これによれば、 h/L のほぼ同一な場合でみると、無次元波力・モーメントは、 H/L が大きくなるに従って減少する傾向にある。無次元波力とモーメントを比べると、両者はよく一致するものの、無次元波力の値がモーメントより若干大きめの値となっている。これは実験における水平波力の合力の作用位置が合田式によるものより若干低いことを意味する。無次元波力・モーメントの値は 0.4 ~ 0.8 となっており、実験値は合田式による算定値より小さい。

図 12.28 に S-3（2 重スリット）を除くすべての遊水タイプにおける無次元モーメントと H/L との関係を示す。この図より、若干の例外はあるものの、無次元モーメントは、 H/L が大きくなるに従って減少する傾向にあることがわかる。また、いずれのケースにおいても実験値は合田式による算定値より小さくなっている。図 12.29 は、波力と H/L との関係をより詳細にみるため、一例として S-5 における無次元波力・モーメントを示したものである。これによれば、 h/L のほぼ同一な場合でみると、無次元波力・モーメントは、 H/L が大きくなるに従って減少する傾向にある。また、無次元波力とモーメントを比較すると、無次元波力が若干大きくなっている。これらの結果は基本タイプと同様で

あるが、無次元波力・モーメントの値は 0.3 ～ 0.7 となっており、基本タイプと比べ小さくなっている。
 (図 12.27 参照) これは、S-5 の反射率が、基本タイプと比べてかなり小さかったためと考えられる。

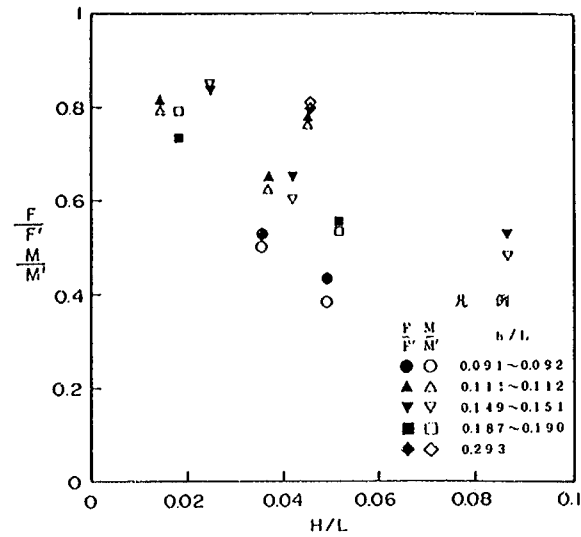


図 12.27 合田波力による無次元波力 F/F' 、無次元モーメント M/M' と H/L の関係
 (基本タイプ, $b/D = 0.2$)

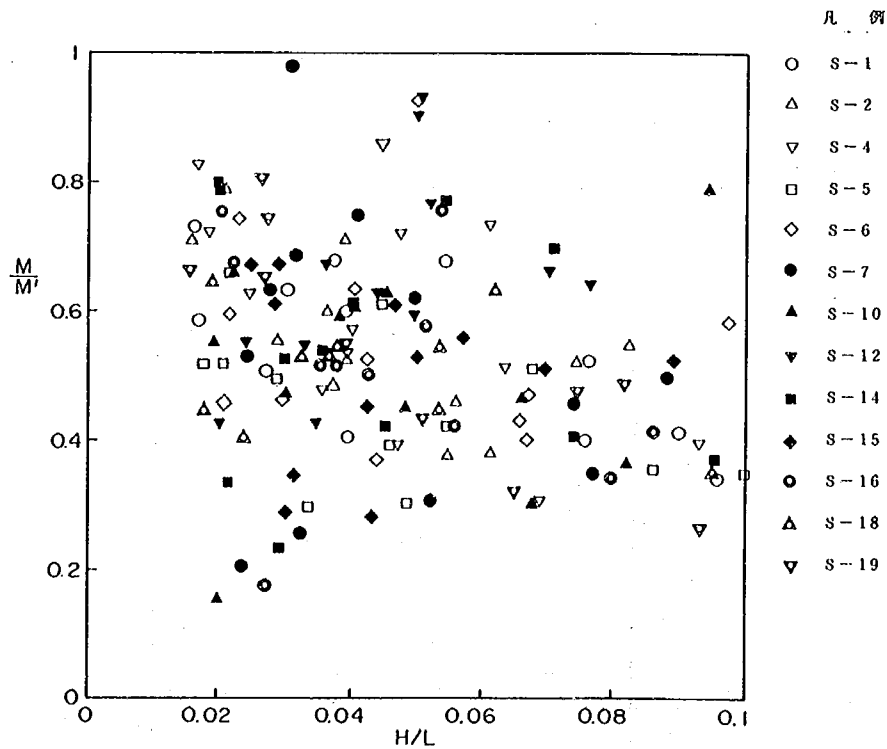


図 12.28 合田波力による無次元モーメント M/M' と H/L の関係 (遊水タイプ)

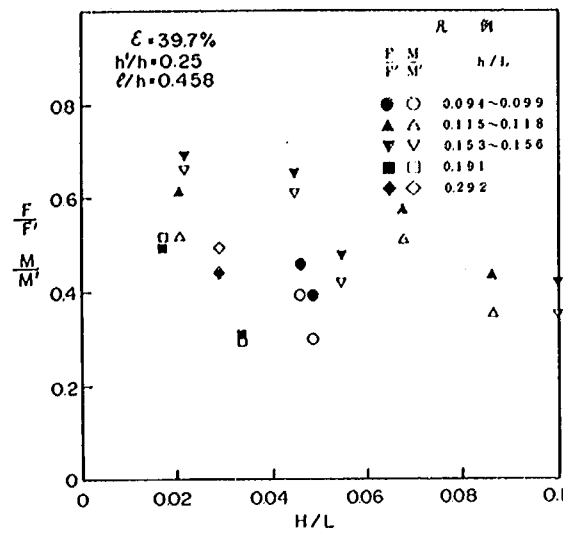


図 12.29 合田波力による無次元波力 F/F' , 無次元モーメント M/M' と H/L の関係 (遊水タイプ, S-5)

図 12.30 にクロスホローケーソンタイプの一例として C-3 における無次元波力・モーメントと H/L との関係を示す。これによれば, 無次元波力は, H/L が大きくなるに従って減少する傾向が若干みられるものの, 余り顕著でなく, 無次元モーメントに関しては傾向が明確でない。また, 無次元波力とモーメントを比較すると, 他のタイプと同様, 無次元波力が大きくなっているが, その差は H/L の小さい場合に大きくなっている。これらの他のタイプと異なる結果は, クロスホローケーソンの複雑な形状に起因するものと考えられる。無次元波力・モーメントの値は, それぞれ 0.5 ~ 0.9, 0.3 ~ 0.8 となっており, 実験値は合田式による算定値より小さくなっている。

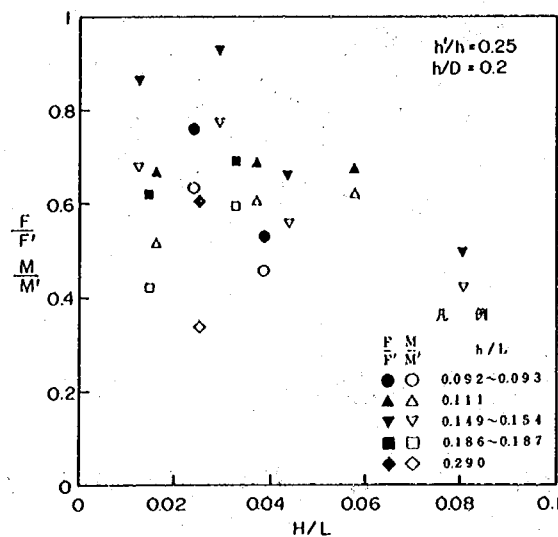


図 12.30 合田波力による無次元波力 F/F' , 無次元モーメント M/M' と H/L の関係 (クロスホローケーソンタイプ, C-3)

以上のように、鋼板セル式海域制御構造物に作用する全体波力は、いずれのタイプにおいても合田波力より小さい。これは合田波力が、反射率がほぼ1の直立壁を対象としたものであるのに対し、実験で扱った構造は、いずれも反射率が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小さくなり、その結果構造物に作用する波力が合田波力に比べ小さくなったものと考えられる。従って、鋼板セル式海域制御構造物を設計する際、構造物全体の安定の検討に用いる波力は、合田波力に適当な低減係数を乗じた値を用いればよいと考えられる。

12. 5. 5 局部波圧の検討

遊水タイプ、クロスホローケーソンタイプの各部材に対し、部材中心線上静水面位置における波圧が最大となった時点の波圧測定結果より、部材全体に作用する水平方向波圧の合力を求め、合田波力との比較を行った。なお、遊水タイプのスリット部材及びクロスホローケーソンの後壁については、入射方向からみた前面側と背面側の両方に異なる波圧が作用するため、前面側に作用する波圧と背面側に作用する波圧の差を作用波圧として用いた。

(1) 遊水タイプのスリット部材波圧合力

図12.31は、スリット部材に作用する波圧合力と合田波力との比 F/F' の算定方法を示したものである。簡略化するため波圧は直線分布とし、波圧合力は測定値を直線で結ぶことにより算定した。また、スリット部材に作用する波圧合力は、実構造物のスリット高さが静水面上2～3m程度であることを考慮し、次のように求めた。すなわち、スリットの上端が静水面上5cm（実スケール2.5m）であると仮定し、遊水室底面と静水面上5cm間の波圧分布より、スリット部材波圧合力を算定した。図12.32は、このようにして求めたスリット部材の F/F' と遊水室奥行との関係を、 F/F' を縦軸に、 l/L_2 を横軸にとって調べたものである。ここで L_2 は遊水室内水深に対する波長である。この図では、ばらつきが大きいものの l/L_2 が大きくなるに従って F/F' が大きくなる傾向がみられ、遊水室内奥行が大きいほど F/F' が大きくなることがうかがえる。このことは、スリット部材に作用する波圧が、スリット部材における反射波と遊水室隔壁における反射波との位相差に大きく影響されることを示唆するものと考えられる。次に、各ケースの結果を比較することにより、遊水室各諸元が波圧合力に与える影響を検討する。S-4 ($h'/h = 0.5$)とS-5 ($h'/h = 0.25$)の違いは遊水室の深さにあるが、 F/F' は同程度であり遊水室深さの影響は少ないと考えられる。一方、スリットの開口率については、S-5 ($\epsilon = 0.397$)とS-10 ($\epsilon = 0.60$)を比較するとS-10の F/F' が小さくなっており、スリット開口率が大きくなると波圧が小さくなる傾向がうかがえる。

F/F' は、S-7における1点を除き、いずれも0.9以下となっている。スリット部材波圧は、遊水室奥行、スリット開口率、波の諸元等多くのパラメータに支配され、個々の構造物に対する波圧を明らかにするには実験による以外困難であるが、今回の実験結果から実際の構造物設計においては、合田波力を用いれば安全であると考えられる。

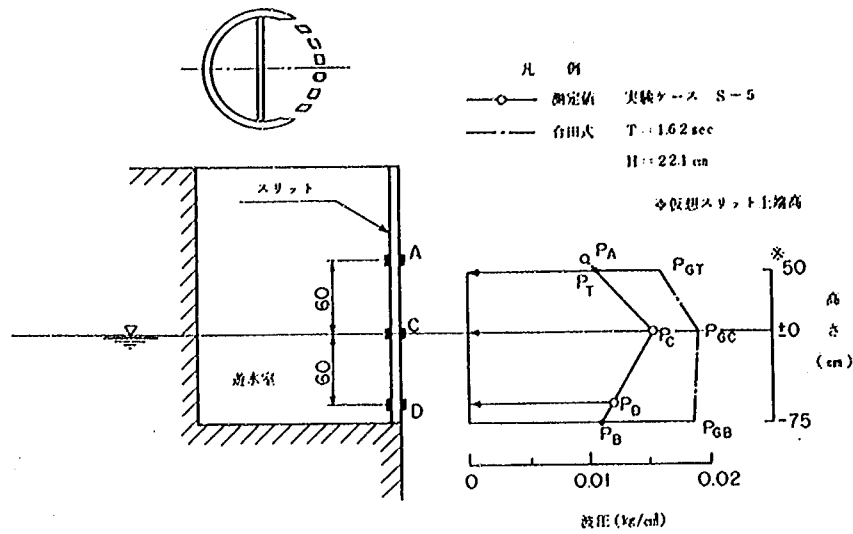


図 12.31 スリット部材波圧合力/合田波力 (F/F') の算定方法 (遊水タイプ)

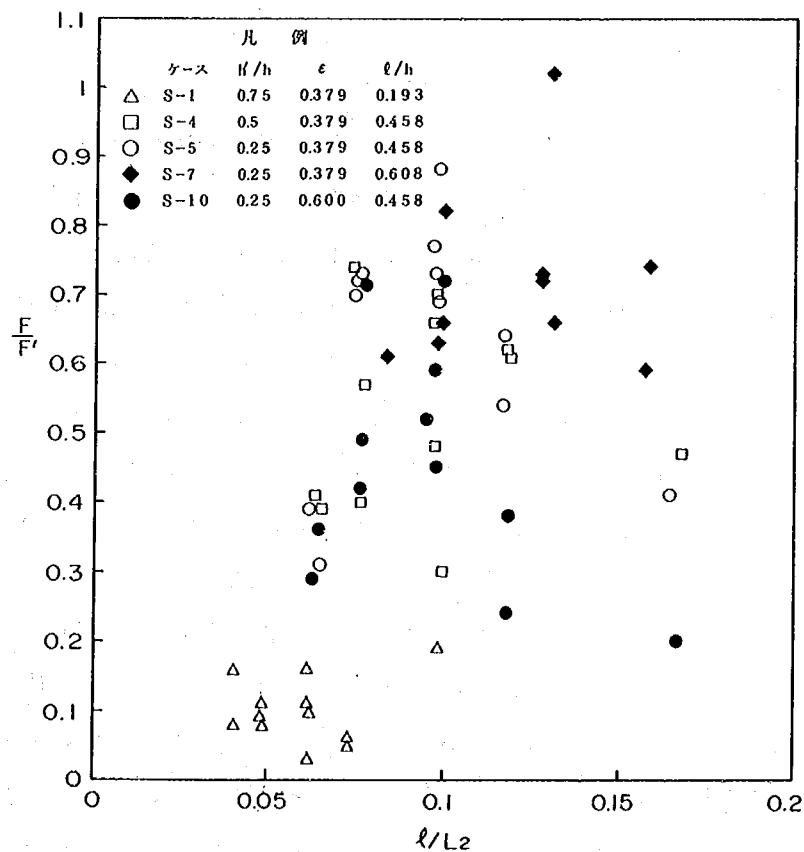
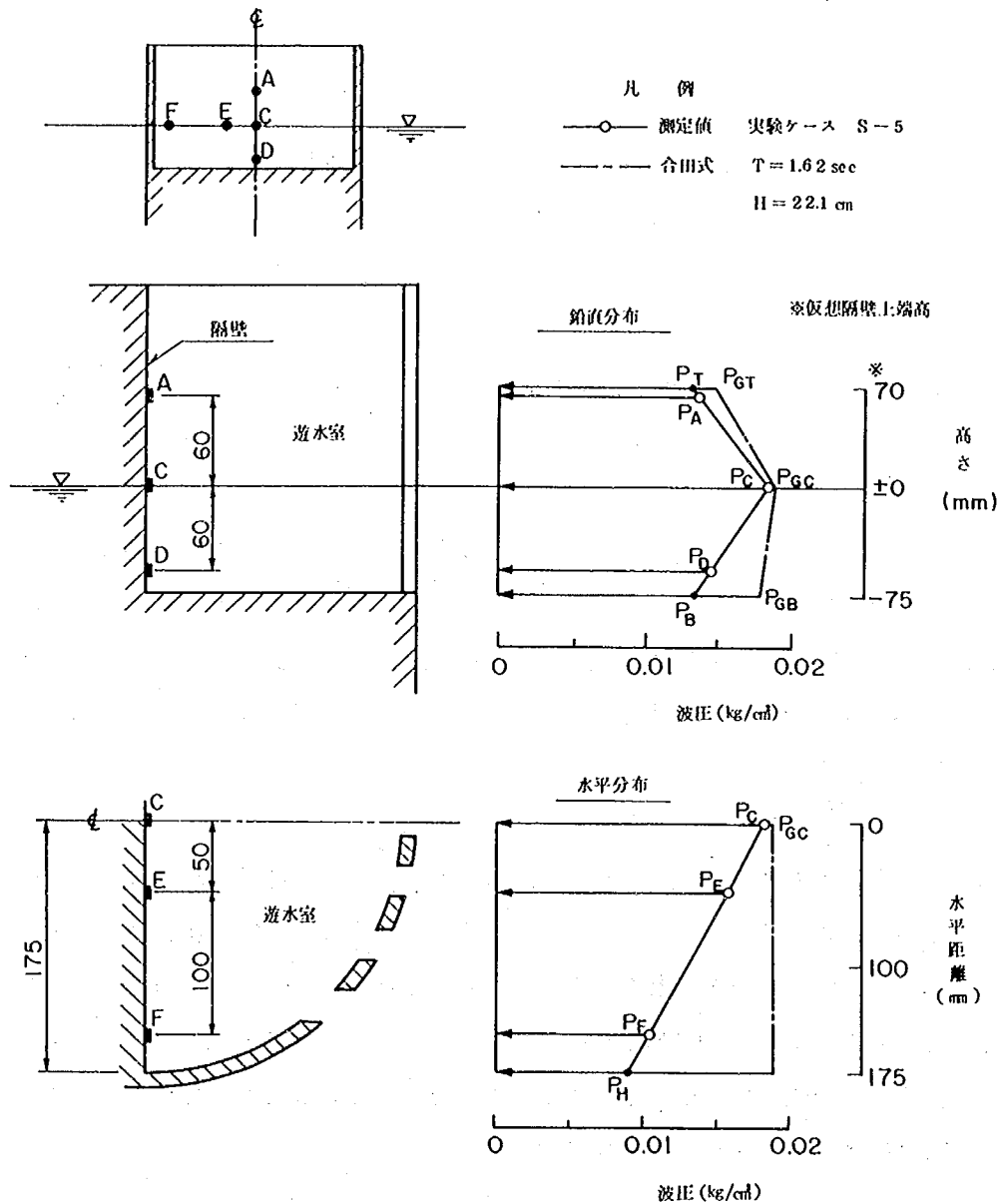


図 12.32 スリット部材波圧合力/合田波力 (F/F') と l/L_2 の関係 (遊水タイプ)

(2) 遊水タイプの遊水室隔壁波圧合力

図 12.33 は、遊水室隔壁に作用する波圧合力と合田波力との比 F/F' の算定方法を示したものである。波圧分布は測定値を直線で結び近似することにより求めた。また、隔壁高さは実構造物における隔壁高さが 3.0 ～ 4.0 m 程度であることを考慮し、隔壁の上端が静水面上 7 cm（実スケール 3.5 m）であると仮定した。図 12.34 はこのようにして求めた F/F' と、波形勾配 H/L との関係を示す。この図より、隔壁の F/F' は H/L が小さいほど大きくなる傾向にあり、その値は 0.4 ～ 1.6 とな



$$\text{無次元波力 } F/F' = \{ (F_C + F_E) \times 5 + (F_E + F_H) \times 12.5 \} / (F_G \times 17.5)$$

$$\text{ここに } F_C = \{ (P_T + P_C) \times 7 + (P_C + P_B) \times 7.5 \} / 2$$

$$F_E = F_C \cdot P_E / P_C$$

$$F_H = F_C \cdot P_H / P_C$$

$$F_G = \{ (P_{GT} + P_{Gc}) \times 7 + (P_{Gc} + P_{GB}) \times 7.5 \} / 2$$

図 12.33 隔壁部波圧合力/合田波力 (F/F') の算定方法 (遊水タイプ)

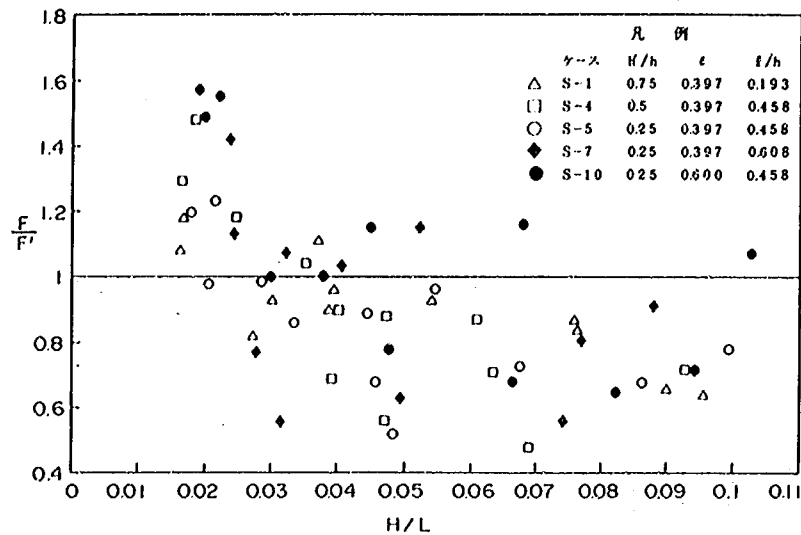
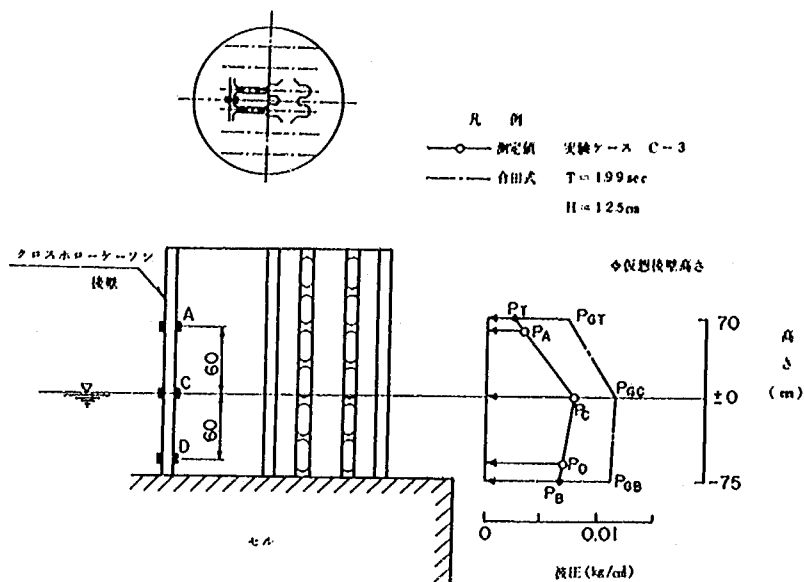


図 12.34 隔壁部波圧合力／合田波力 (F/F') の H/L の関係 (遊水タイプ)

っていることがわかる。特に H/L が 0.025 以下においては、ほとんどの点で合田波力より大きくなっている。従って、実際の構造物設計においては、特に波形勾配が小さい場合、合田波力より大きな波力を考慮する必要がある。各実験ケースを比較すると、S-4 ($h'/h = 0.5$) と S-5 ($h'/h = 0.25$) ではほとんど差がなく、遊水室の深さにはあまり影響されないと考えられる。また S-5 ($\varepsilon = 0.397$) と S-10 ($\varepsilon = 0.6$) を比較すると S-10 が大きめの値を示しておりスリット開口率が大きいほど波圧が大きくなる傾向がうかがえる。一方、S-1 ($\ell/h = 0.193$, $h'/h = 0.75$) に関しては、スリット部材の波圧と異なり、他のケースとさほど差が生じておらず、また S-5 ($\ell/h = 0.458$) と S-7 ($\ell/h = 0.608$) との差も小さい。このことから、遊水室隔壁波圧に対する遊水室奥行の影響はあまりないと考えられる。

(3) クロスホローケーソンタイプ後壁の波圧合力

図 12.35 は、クロスホローケーソン後壁に作用する波圧合力と合田波力との比 F/F' の算定方法を示したものである。波圧分布は、測定値を直線で結び近似することにより求めた。また、後壁高さは、遊水室隔壁の場合と同様、静水面上 7 cm であると仮定した。図 12.36 にこのようにして求めた F/F' と H/L との関係を示す。この図からクロスホローケーソン後壁の F/F' は、 H/L が大きくなるに従って減少する傾向にあり、その値は 0.4 ~ 1.2 となっていることがわかる。特に H/L が 0.02 を超える場合にはすべてのケースで 0.8 以下となっている。



$$\text{無次元波力 } F/F' = \{ (P_T + P_C) \times 7 + (P_C + P_B) \times 7.5 \} / \{ (P_{GT} + P_{GC}) \times 7 + (P_{GC} + P_{GB}) \times 7.5 \}$$

図 12.35 後壁部波圧合力／合田波力 (F/F') の算定方法
 (クロスホローケーソンタイプ)

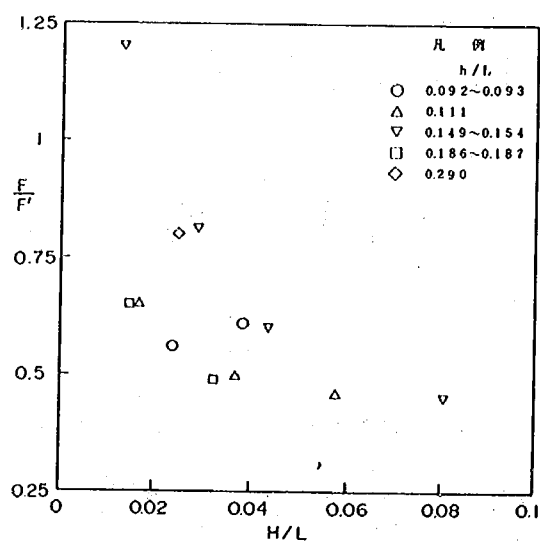


図 12.36 後壁部波圧合力／合田波力 (F/F') と H/L の関係
 (クロスホローケーソンタイプ, C-3)

12. 5. 6 遊水タイプ遊水室内外水位差

図 12. 37, 12. 38 は S - 5 における遊水室内外水位の測定例を示す。このうち図 12. 37 は周期 $T = 0.83$ 秒, 図 12. 38 は $T = 1.96$ 秒の場合である。なお, 測定位置は図 12. 8 に示す通り, 遊水室内外水位ともスリット中心から 5 cm である。図 12. 37 によれば周期の短い波の場合, 遊水室内外の水位がピークに達する時期はほぼ同様であるが, そのピークの大きさは遊水室前面側が大きくなっている。その後前面水位が下降しても遊水室内水位は下降せずに, 前面の水位が上昇し始めるころ下降し始めていることがわかる。すなわち進行波の峰通過時には前面側水位が高く, 谷通過時には逆に遊水室内水位が高くなっており, それぞれ水位の高い方から低い方へ水の流れが生じていることがわかる。一方, 周期の長い場合には図 12. 38 に見られるように, 遊水室内外水位における位相差は小さく, 両者はほぼ同じタイミングで上昇, 下降している。水位の大きさをみると峰の高さはほぼ同程度であるのに対し, 谷の場合には遊水室前面水位が低くなっており, 水位差が生じている。すなわち周期の長い場合, 進行波の峰通過時にはあまり水位差が生じないものの, 谷通過時には遊水室内水位が高くなることがわかる。遊水室の存在が反射率を低減させる要因の一つとして, 遊水室に水が一時的に貯留されることによる効果が考えられるが, 以上の測定結果より, その効果は遊水室内外水位の位相差が大きい短周期の波に対して顕著であると考えられる。このことは, 図 12. 17 において h/L が大きいほど反射率が減少していることの一つの要因を与えると推定される。

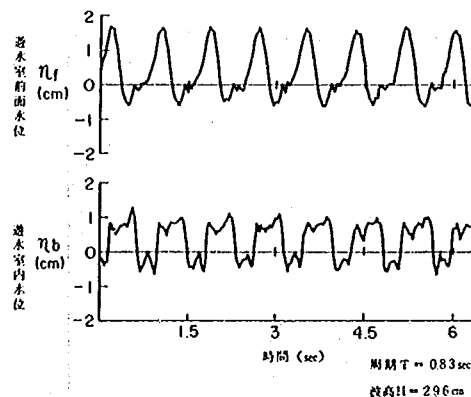


図 12.37 遊水タイプ遊水室内外水位 (S - 5, $T = 0.83\text{sec}$)

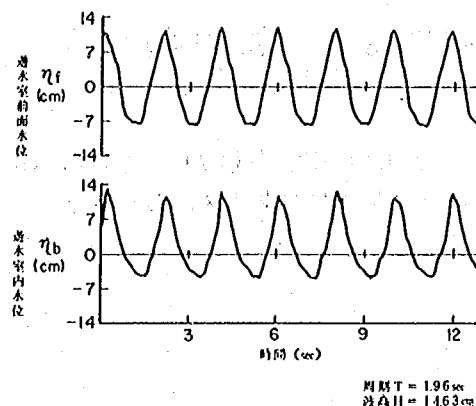


図 12.38 遊水タイプ遊水室内外水位 (S - 5, $T = 1.96\text{sec}$)

12.6 ま と め

実験により下記の事項が明らかになった。

- ① 今回実施したすべての波浪条件 ($H/L = 0.02 \sim 0.1$, $h/L = 0.09 \sim 0.28$) において, 消波効果のめやすである透過率 0.6 以下, 反射率 0.5 以下を満たしたものは, 遊水タイプにおける次の 3 ケースであった。

$$S-5: \epsilon = 0.397, h'/h = 0.25, \ell/h = 0.458$$

$$S-16: \epsilon = 0.60, h'/h = 0.125, \ell/h = 0.458$$

$$S-18: \epsilon = 0.397, h'/h = 0.375, \ell/h = 0.458$$

- ② 遊水タイプ遊水室諸元の反射率におよぼす影響は, 谷本等の方法により定性的傾向を把握することが可能であり, 遊水室諸元の最適構造はこの方法により推定し得る。
- ③ 基本タイプ, 遊水タイプ, クロスホローケーソンタイプとも, 今回の実験範囲 ($h/L = 0.09 \sim 0.28$) においては波長が大きくなるに従い透過率が増加する傾向にある。
- ④ 遊水タイプの遊水室内にもう 1 つの縦スリットを設けた 2 重スリット構造は反射率の改善に寄与しない。
- ⑤ セル構造物全体に作用する波力及びモーメントは, 直立壁に対する合田波力より小さい。各タイプにおける合田波力との比率の例は, 次の通りである。
- 基本タイプ (F) : $F/F' = 0.4 \sim 0.8$, $M/M' = 0.4 \sim 0.8$
- 遊水タイプ (S-5) : $F/F' = 0.3 \sim 0.7$, $M/M' = 0.3 \sim 0.7$
- クロスホローケーソンタイプ (C-3) : $F/F' = 0.5 \sim 0.9$, $M/M' = 0.3 \sim 0.8$
- ⑥ 遊水タイプスリット部材に作用する波力は概ね合田波力の 0.9 倍以下である。
- ⑦ 遊水タイプ隔壁に作用する波力は波形勾配が小さい波に対し合田波力を上回り, 最大で合田波力の 1.6 倍程度となる。

12.7 今後の検討課題

(1) 設計外力に関する課題

今回の実験により各タイプの水平波力, モーメント及び遊水タイプにおけるスリット部, 遊水室隔壁部の局部波圧データが得られたが, 今後はこれらのデータに基づき設計外力の算定法を確立する必要がある。また設置される海域によっては碎波時の衝撃波力が作用することも予想され, これについては別途実験により作用力を求める必要がある。

(2) 細部構造に関する課題

根入れ式鋼板セル構造物は護岸構造物として実用化されており, 構造物全体の安定性に関する課題

は少ないが、遊水タイプにおけるスリット部及び遊水室の構造もしくはクロスホローケーソンとセル体との結合方法等の細部構造に関し、上記設計外力も含め、検討していく必要がある。

(3) 海浜地形変化に関する課題

海域制御構造物は、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変化を予測することは重要である。基本タイプのセル離岸堤に関してはすでに移動床実験を実施した例¹⁾があるが、他のタイプに関しても移動床実験により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。

(4) 経済性及び施工性に関する課題

海域制御構造物は、海象条件の厳しい大水深域に設置されることが予想され、そのために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) 建設省土木研究所海岸研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(2)，土木研究所資料 第 2510 号，pp. 59 ～ 79, 1987.
- 2) たとえば 近藤叔郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，275p，1983.
- 3) 宇多高明・村井禎美・小国嘉之・飯村修・高瀬幸紀：根入れ式鋼板セル離岸堤に関する共同研究報告書，土木研究所資料，第 2435 号，89p，1987.
- 4) 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, No. 3 pp. 43 ～ 77, 1982.
- 5) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港研報告，Vol. 12, No. 3, pp. 31 ～ 69, 1973.

第13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 (3)

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

山本 幸次

(株)大林組技術開発本部海洋技術部 藤沢 康雄

13.1 まえがき

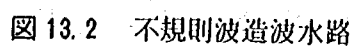
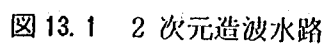
本研究は、波、流れ、漂砂等を制御することにより外洋に面した沿岸域を有効に利用するための新しい海域制御構造物を開発することを目的とする。本海域制御構造物で期待する機能は、波運動を流れや渦等の乱れに変換し、若干の反射を組み合わせた複合消波機能である。これまでの研究で、良好な消波特性を有する模型形状の選択が可能となっている^{1), 2)}。しかし、複合消波構造物の最適形状とその消波特性についてはまだ不明確な点が残されている。そこで、ここでは、複合消波構造物を構成する水平板、Y型垂直板、V型遊水部の個々の諸元を変化させると共に、下部構造を含む全体模型を用いて、規則波及び不規則波による2次元水理模型実験を行い、各構成部材の持つ水理学的機能を明らかにした。

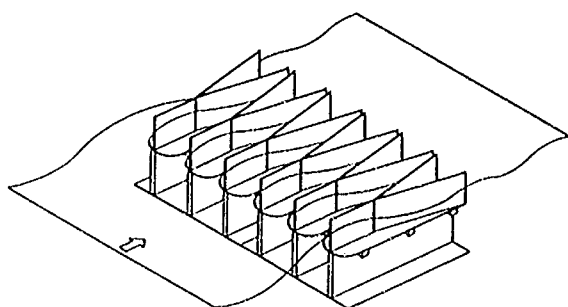
13.2 実験方法

規則波実験は、日本大学理工学部海洋建築工学科の2次元造波水路を用いて行った。水路は長さ30m、幅1.35m、水深1mの諸元を有する(図13.1参照)。この水路を2分し、0.8mの水路に仮底を設けて実験した。仮底は造波板から2.1m離れた位置より1/8勾配の斜面とし、水深0.4mの位置より平坦とした。平坦部の長さは16mである。模型は平坦部の中央に設置し、模型中央から沖側4mの地点に入・反射波分離用の波高計H2、H3を間隔0.4mで、また、岸側4mの地点に透過波高計測用の波高計H4を設置した。さらに、0.55mの水路には沖波計測用と、波高の再現性をチェックするための波高計H1を模型の真横に設置した。不規則波実験は、建設省土木研究所波浪実験棟内の長さ142m、水深1mの不規則波造波水路を用いて行った(図13.2参照)。水路中に1/50勾配の斜面を造り、水深が0.4mの位置より平坦とした。模型は、この平坦部に設置した。また、入・反射波及び透過波測定用に模型の前後5mの位置に0.2m間隔で波高計を設置した。

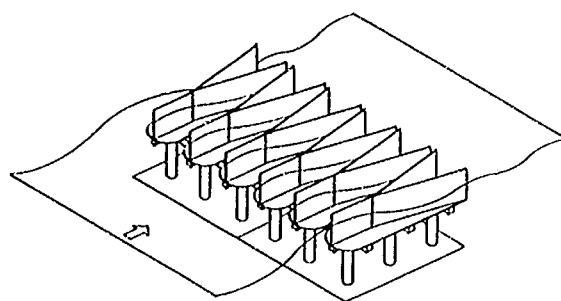
実験模型は、図13.3に示す2種類の全体模型(柱式、壁式)と図13.4に示す6種類の上部消波構造物模型(M-1～M-6模型)を用いた。

模型のパラメータとして、隣接する水平板の間隔を水平スリットと呼び、その間隔を水平板間隔 W_B とする。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 (W_e/W)と定義した。さらに、模型後端部からV型遊水部の頂部までの長さをV型遊水部の奥行 d と定義した。模型のY型垂直板の開閉角 θ は、 $\theta = 21^\circ$ とした。また、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、V型遊水部の構造補強としてV型遊水部の上部に蓋(図13.4の黒塗り部分)を取り付けてある。また図13.4のうち、M-5、M-6模型における網掛け部分は、V型遊水部の入口を不透過壁で閉じたときに形成された空間であって、消波機能は持たない。また、M-3模型の網掛け部分は、スリット部を不透過板で置き換えた部分を表わす。実験模型の諸元を表13.1に、また、6タイプの模型のパラメータを表13.2に示す。なお、実験模型の縮尺は1/25である。

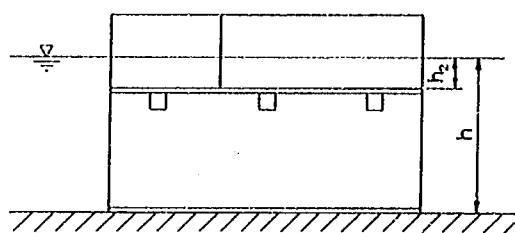




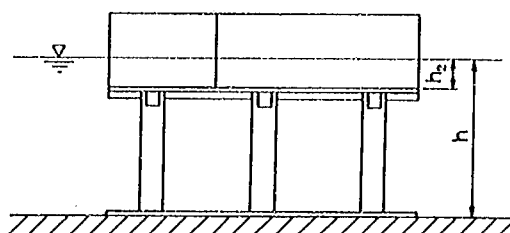
壁式全体模型



柱式全体模型

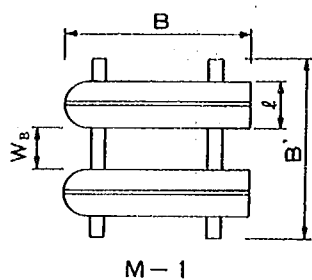


壁式側面図

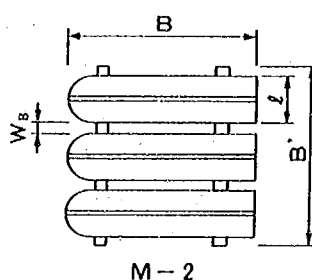


柱式側面図

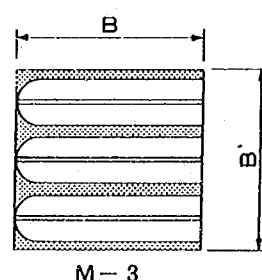
图 13.3 壁式・柱式全体模型



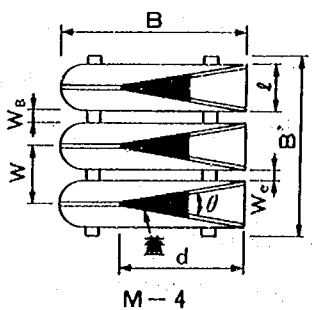
M-1



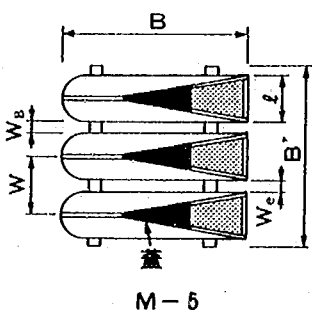
M-2



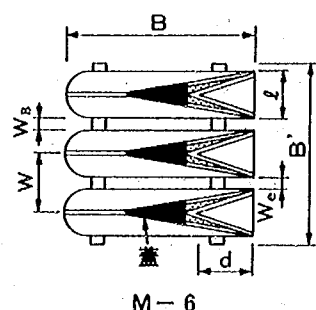
M-3



M-4



M-5



M-6

图 13.4 上部消波構造物実験模型

表 13.1 実験模型諸元

項 目	実海域	模型 (縮尺 1/25)
水 深 (h)	10 m	40 cm
水平板長さ (B)	20 m	80 cm ($B/h = 2.0$)
水平板幅 (ℓ)	5 m	20 cm ($\ell/h = 0.25$)
水平板没水深 (h_2)	2 m	8 cm ($h_2/h = 0.2$)
模 型 幅 (B')	20 m	80 cm

表 13.2 模型パラメータ

模型形状名称	水平板間隔	開閉角 θ	Y型垂直板 端 部 間 隔	開口率 ϵ (W_e/W)	V型遊水部 の奥行 d
M - 1 模型	16.3 cm				
M - 2 模型	6.7 cm				
M - 3 模型					
M - 4 模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25%	$d/B = 2/3$
M - 5 模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25%	V型遊水部 を蓋で閉鎖
M - 6 模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25%	$d/B = 1/3$
壁式全体模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25%	$d/B = 2/3$
柱式全体模型	6.7 cm	21 deg.	$W = 26.7\text{cm}$ $W_e = 6.7\text{cm}$	25%	$d/B = 2/3$

規則波実験は、表 13.3 に示す波浪条件を用いて全ての模型について行った。不規則波実験は Bretschneider・光易型のスペクトルで有義波周期、有義波高を変化させ表 13.4 に示す 4 種類の波浪条件を用いて柱式・壁式の全体模型について行った。なお、全ての模型は、水平板の没水深を 8 cm ($h_2/h = 0.2$) とした。

規則波実験の解析は波エネルギーが十分に伝達され、かつ、消波ビーチからの反射や造波板からの再反射が到達しない範囲で行った。波高計 H1, H4 で計測されたデータをもとに FFT 処理を行い、沖波波高 H_0 、透過波高 H_T を求めた。さらに、波高計 H2, H3 で計測された入射波と反射波の合成波高データより FFT 処理を行い、合田ほか³⁾ の分離推定法によって入射波高 H_I と反射波高 H_R に分離した。これらの結果より、透過率 K_T (H_T/H_I)、反射率 K_R (H_R/H_I) を求めた。

不規則波実験の解析は⁴⁾、波が安定した直後のデータをもとに合田ほか³⁾ の手法を用いて、入・反射波の分離、透過率及び反射率の算定を行った。これから得られた入射波、反射波及び透過波のスペク

表 13.3 規則波の波浪条件

周 期 T (sec)	沖波波高 H ₀ (m)	沖波波長 L ₀ (m)	入射波高 H _i (m)	入射波長 L (m)	入射波波形勾配 H _i / L	相対幅 B / L
1.0		1.56	0.086	1.46	0.059	0.547
1.2		2.25	0.091	1.93	0.047	0.414
1.4		3.06	0.085	2.39	0.036	0.335
1.5		3.51	0.088	2.61	0.034	0.306
1.6	0.08	3.99	0.091	2.83	0.032	0.282
1.7		4.51	0.088	3.05	0.029	0.262
1.8		5.05	0.094	3.27	0.029	0.245
1.9		5.63	0.090	3.48	0.026	0.230
2.0		6.24	0.090	3.69	0.024	0.217

表 13.4 不規則波の波浪条件

波浪No.	有義波高 H _{1/3} (m)	有義周期 T _{1/3} (sec)	入射波波長 L _{1/3} (m)	入射波波形勾配 H _{1/3} / L _{1/3}	相対幅 B / L _{1/3}
1	0.04	1.2	1.93	0.021	0.414
2	0.04	1.6	2.83	0.014	0.282
3	0.07	1.6	2.83	0.025	0.282
4	0.08	2.0	3.69	0.026	0.217

トル密度 $S_I(f)$, $S_R(f)$ 及び $S_T(f)$ を $f_{\min} = 0.29 \text{ Hz}$ ($B/L = 0.12$) から $f_{\max} = 1.87 \text{ Hz}$ ($B/L = 1.8$) の範囲で積分し, 入・反射波及び透過波のエネルギー E_I , E_R 及び E_T を求めた。これより, 透過率 K_T , 反射率 K_R は次式によって求めた。

$$K_{TE} = \sqrt{E_T / E_I} \quad (13.1)$$

$$K_R = \sqrt{E_R / E_I} \quad (13.2)$$

一方, 透過率 K_T は, 波高比からも定められる。

$$K_T = H_T / H_I \quad (13.3)$$

ここで, 入射波高 H_I は, 入・反射波の合成波の有義波高 $H_{0.1/3}$ (模型前面の 2 本の波高計 H_1 , H_2 の有義波高の平均値) と反射率 K_R から, 次式で推定できる。

$$H_I = H_{0.1/3} / \sqrt{1 + K_R^2} \quad (13.4)$$

また, エネルギー損失率 K_L^2 , K_{LE}^2 は次式で求めた。

$$K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad (13.5)$$

$$K_{LE}^2 = 1 - K_{TE}^2 - K_R^2 \quad (13.6)$$

13.3 実験結果と考察

13.3.1 規則波実験による透過率、反射率及びエネルギー損失率の検討

(1) 水平板間隔の消波特性に及ぼす影響

水平板間隔の消波特性に及ぼす影響を明らかにするため、水平板と垂直板から構成された模型 (M-1, M-2, M-3 模型) の水平板間隔 W_B (M-1 : 20cm, M-2 : 6.7 cm, M-3 : 0 cm) を変えて実験を行った。透過率 K_T , 反射率 K_R を図 13.5 に示す。縦軸は K_T と K_R を示し、横軸は入射波長 L で無次元化した模型幅 B である。透過率は全体的に B/L の増加に伴い小さくなり、水平板間隔の違いにかかわらず、 $B/L = 0.28$ で落ち込む現象がみられる。反射率は、 B/L に対する変化が透過率ほど大きくなく、ほぼ一定の値を示す、また、全体的に透過率は M-1 模型よりも M-2 模型の方が小さく、M-3 模型は M-2 模型よりも大幅に小さくなる。反射率は M-1 模型よりも M-2 模型の方が若干大きく、M-3 模型は M-2 模型よりも大幅に大きい。この理由は、次のように考えられる。水平板は、波を滑らかに模型内に導入し、水平スリットを通過する時に渦を発生させて消波を行う機能を有する。水平板間隔が狭くなると水平スリットを通過する水粒子の運動が激しくなり、水平スリット内の渦の発生が促進されるため、透過率は小さくなる。さらに、水平板間隔を狭くすると模型の水平投影面積が増し、反射率が大きくなる。以上の点より、水平板間隔を狭くすると、透過率は小さくなるが、逆に反射率は大きくなる。さらに、M-2 模型と M-3 模型の透過率の大きな差から見て、水平板間隔を M-2 模型の間隔よりもさらに狭くすることによって、より小さな透過率が期待できる。水理特性にもたらす水平板間隔の影響は複合消波構造物全体の消波性能にも大きく影響する。このため、水平板間隔をより狭くした場合について、今後、水理模型実験を行い検討する必要がある。

水平板間隔のエネルギー損失率へ及ぼす影響を図 13.6 に示す。エネルギー損失率は B/L が増大するほど、また、水平板間隔が狭くなるほど大きくなる。しかし、水平スリットが無い M-3 模型の場合、M-2 模型に比較して透過率が大幅に小さくなっているにもかかわらず、反射率が大きいため、エネルギー損失率はさほど大きくはならない。

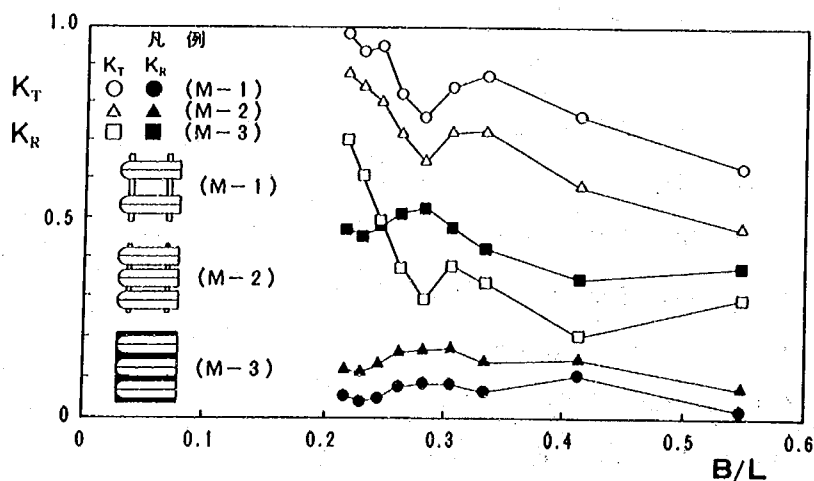


図 13.5 水平板間隔をパラメータとした K_T , K_R と B/L の関係
($H_0 = 8$ cm, $h_2/h = 0.2$)

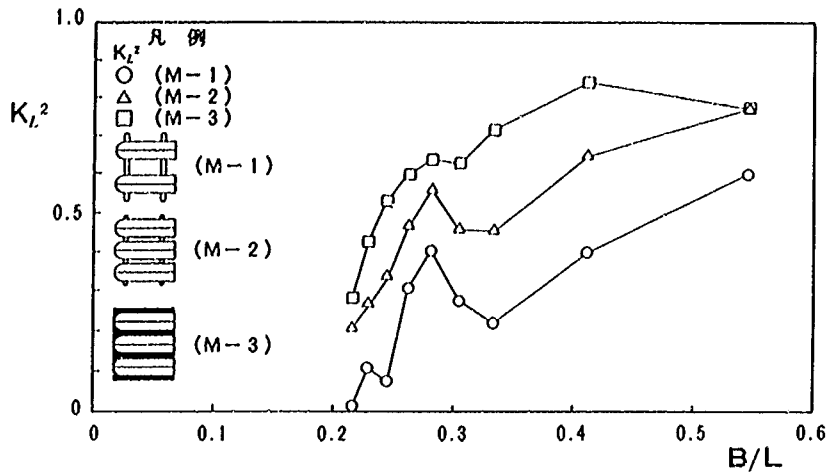


図 13.6 水平板間隔をパラメータとした K_L^2 と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

(2) Y型垂直板の消波特性に及ぼす影響

M-5 模型は Y 型遊水部の後端に蓋を取り付けて閉鎖することにより、M-2 模型に Y 型垂直板のみを取り付けた模型形状となっている。つまり、水平板による消波機能に、Y 型垂直板による収斂機能を付加した模型である。両者の実験結果の比較を図 13.7 に示す。Y 型垂直板模型は収斂機能が無い垂直板模型に比べて、 $B/L = 0.3 \sim 0.55$ の範囲で透過率を 0.1 程度、また、 $B/L = 0.23 \sim 0.42$ の範囲で反射率を最大 0.15 程度小さくする特性を有している。透過率、反射率が小さくなった理由は、Y 型垂直板による収斂機能が付加されて、垂直板模型よりも波高が増大し、水平スリットを通過する水粒子の運動が激しくなり、渦の発生が増加したためと考えられる。また、Y 型垂直板後端部からの渦の発生によるエネルギーロスにもよると考えられる。Y 型垂直板のエネルギー損失率へ及ぼ

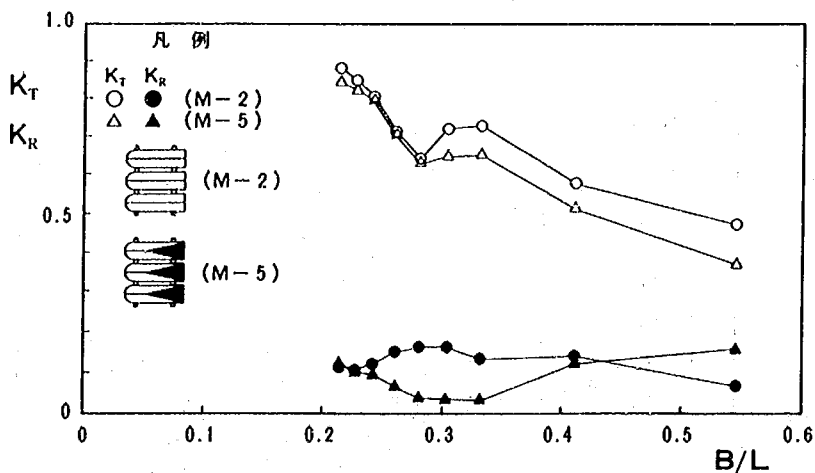


図 13.7 Y 型垂直板をパラメータとした K_T , K_R と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

す影響を図 13.8 に示す。エネルギー損失率も $B/L = 0.3 \sim 0.55$ の範囲で Y 型垂直板を取り付けた M-5 模型の方が大きい値を示している。なお、 B/L の小さな方では、透過率、反射率、エネルギー損失率とも大きく変わらない。

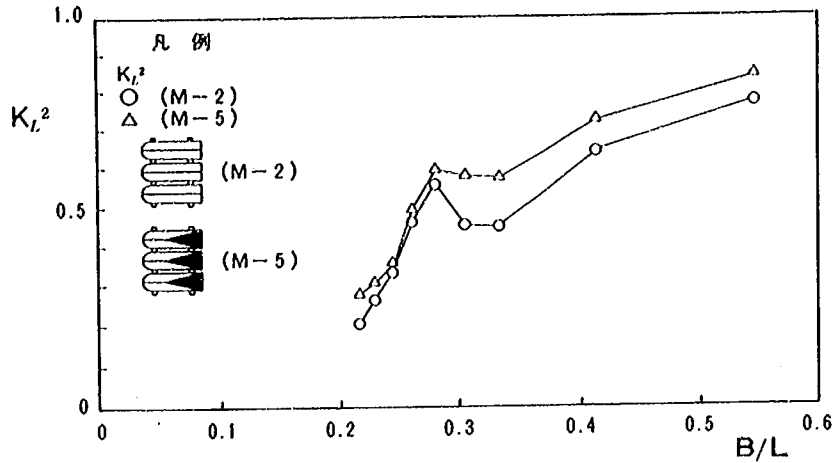


図 13.8 Y 型垂直板をパラメータとした K_L^2 と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

(3) V 型遊水部の消波特性に及ぼす影響

V 型遊水部の奥行き d が異なる M-4, M-6, M-5 模型 ($d : 2B/3, B/3, 0$) の消波特性の比較を図 13.9 に示す。V 型遊水部の機能が無い M-5 模型を基準にして実験結果を比較すると、V 型遊水部の奥行きが浅い M-6 模型の場合は B/L が大きくなると、また、奥行きが深い M-4 模型の場合は B/L が小さくなると透過率が小さくなることがわかる。反射率は V 型遊水部の奥行きが深い M-4 模型の場合に B/L の小さい方で若干増大し、奥行きが浅い M-6 模型の場合にはあまり顕著な差は見られない。

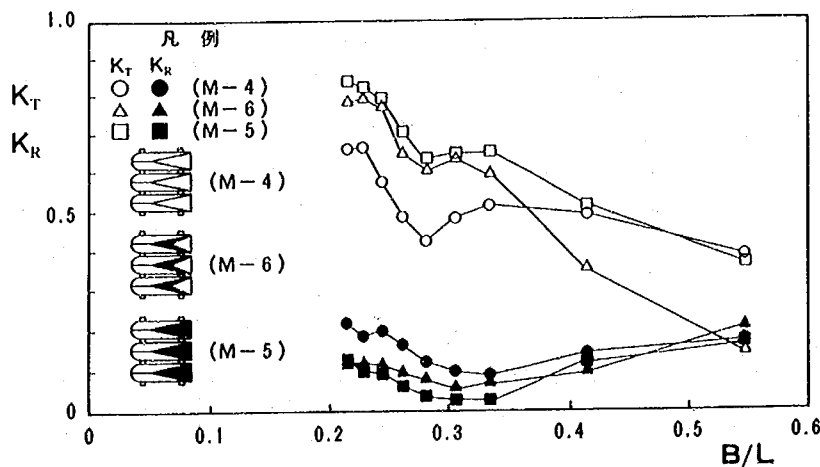


図 13.9 V 型遊水部の奥行きをパラメータとした K_T , K_R と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

V型遊水部の奥行が透過率に及ぼす影響をより明確にするために、V型遊水部を塞いだM-5模型を基準として、M-4、M-6模型の透過率との差 ΔK_T を図13.10に示す。 ΔK_T は奥行が深いM-4模型の場合には $B/L = 0.27$ 付近で、また、奥行の浅いM-6模型では $B/L = 0.55$ 付近で最大値を示し、その値は両者共約0.25と変わらない。 $B/L = 0.27$ 、 $B/L = 0.55$ より波長を逆算すると、それぞれ2.96 m、1.45 mとなる。この波長とV型遊水部の奥行 $d = 2B/3$ 、 $B/3$ との比をとるとそれぞれ5.56、5.45となる。このことから、今回の水理模型実験で行った2種類の奥行の場合、V型遊水部は、その奥行の約5.5倍の波長を持つ入射波に対して高い消波特性を示すことがわかる。

次に、V型遊水部の奥行長さのエネルギー損失率へ及ぼす影響を図13.11に示す。V型遊水部の機能が全くないM-5模型を基準にして実験結果を比較すると、V型遊水部の奥行が浅いM-6模型の場合は B/L が大きくなると、また、奥行が深いM-4模型の場合は B/L が小さくなるとエネルギー損失率が大きくなることがわかる。

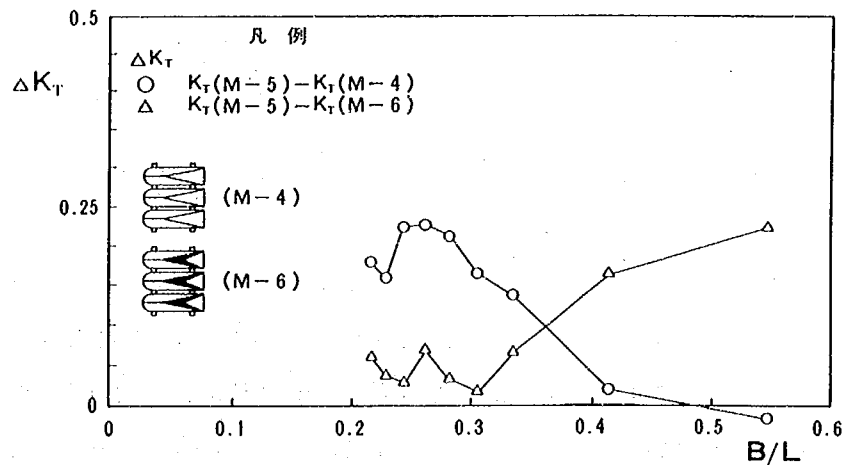


図 13.10 V型遊水部の奥行をパラメータとした ΔK_T と B/L の関係
(M-5模型との比較, $H_0 = 8$ cm, $h_2/h = 0.2$)

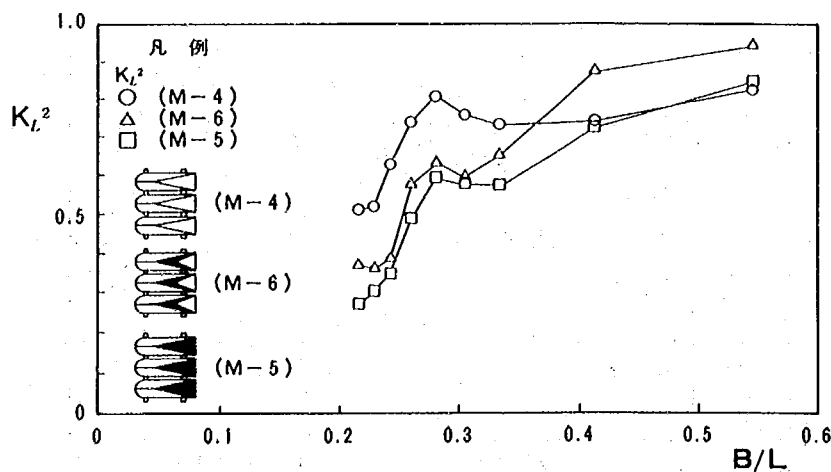


図 13.11 V型遊水部の奥行をパラメータとした K_L^2 と B/L の関係
($H_0 = 8$ cm, $h_2/h = 0.2$)

(4) 全体模型の消波特性及び機能

複合消波構造物は実海域に設置する場合、支持構造物によって海底に固定する必要がある。基本形状であるM-4模型に壁式の下部構造を付けた壁式全体模型、及び柱式の下部構造を付けた柱式全体模型の透過率、反射率を図13.12に示す。壁式、柱式全体模型とも下部構造を変えても消波特性はほぼ同じであり、顕著な差を示さない。そこで、柱式、壁式をまとめて下部構造物と呼び考察する。

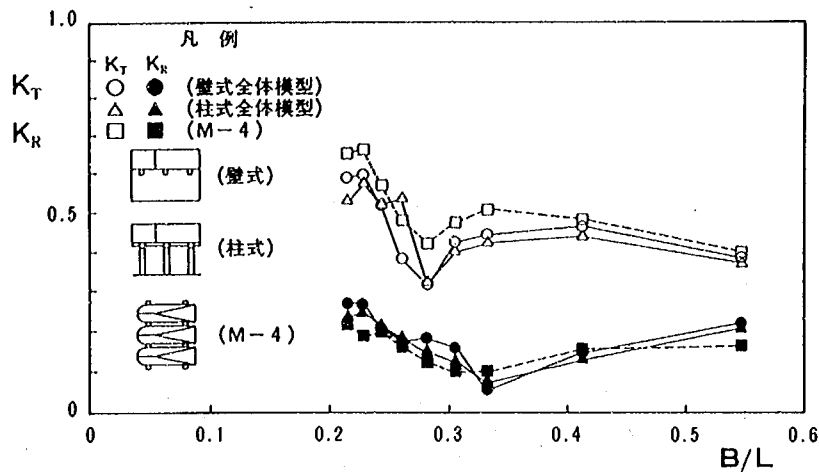


図13.12 下部構造をパラメータとした K_T , K_R と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

下部構造物の無いM-4模型の場合に比較して、下部構造物を取り付けた全体模型の場合は、透過率が若干小さくなり、反射率が若干大きくなる。しかし、全体的に顕著な影響はなく、壁式、柱式全体模型は $B/L = 0.22 \sim 0.55$ の範囲で透過率0.6以下、反射率0.25以下の値を示す。また、透過率は $B/L = 0.28$ 、反射率は $B/L = 0.33$ で最小値を示し、その値は透過率で約0.3、反射率で約0.05である。M-4模型と下部構造物を付けた模型のエネルギー損失率を比較すると、(図13.13参照)、本消波構造物は下部構造物を取り付けることによってエネルギー損失率が若干大きくなり、 $B/L = 0.27 \sim 0.55$ の範囲でエネルギー損失率約0.8以上を示す。

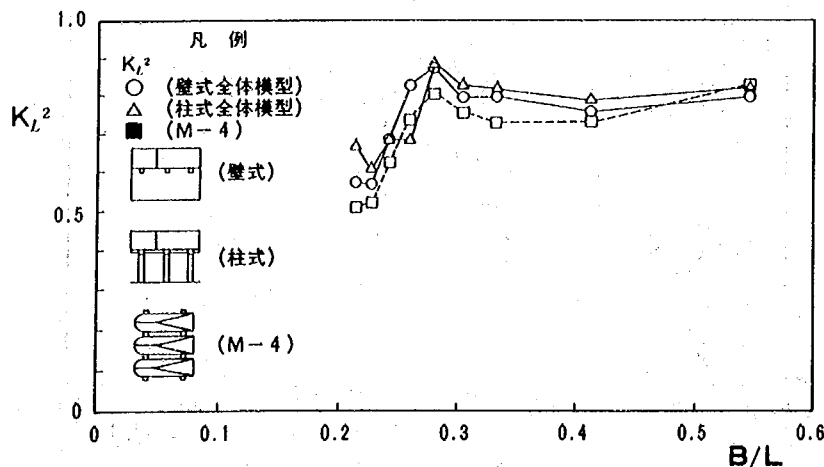


図13.13 下部構造をパラメータとした K_L^2 と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

13. 3. 2 規則波実験による波力の検討

水平板間隔とV型遊水部の奥行の変化に対する波力の相違について考察する。なお、各波力は1波長の最大値と最小値をそれぞれ3波分とり、その平均値をプラス側とマイナス側に分けて示す。

(1) 水平波力

水平板間隔の違いによる水平波力の変化を図13.14に示す。縦軸は水平波力と $\rho g H_1 B' h_2$ の比である。ここに、 ρ は水の密度($102.04 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^2$)、 g は重力加速度(9.8 m/sec^2)である。水平波力は水平板間隔が狭くなるにつれて、大きくなる。次にV型遊水部の奥行の違いによる水平波力の相違を図13.15に示す。水平波力はV型遊水部の奥行が深くなるにつれて大きくなる傾向がある。また、奥行の深いM-4模型は B/L が大きくなるとV型遊水部を塞いだ場合とほぼ同じ値となり、無次元波力にして0.2程度となる。また、 B/L が小さくなると無次元波力にして0.8程度を示す。

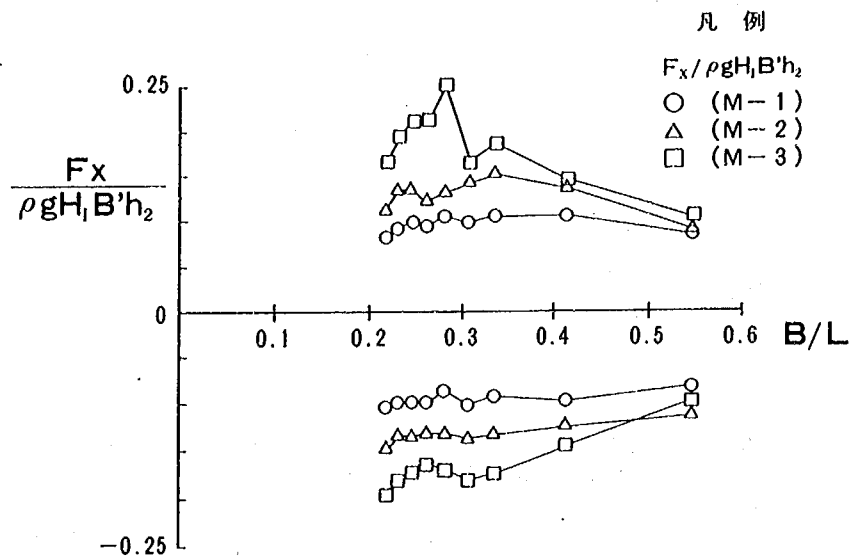


図13.14 水平板間隔をパラメータとした無次元水平波力と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

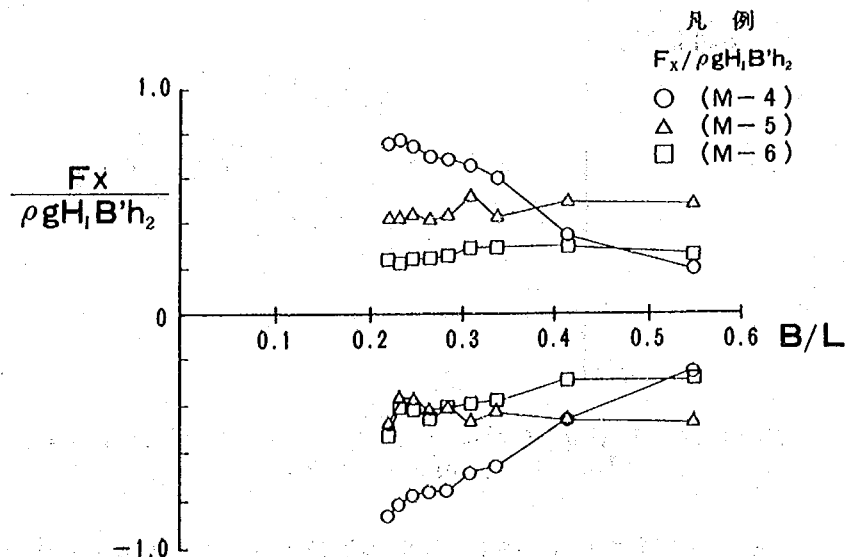


図13.15 V型遊水部の奥行をパラメータとした無次元水平波力と B/L の関係
($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

(2) 鉛直波力

水平板間隔の違いによる鉛直波力の変化を図 13. 16 に示す。縦軸は鉛直波力と $\rho g H_1 B B'$ の比である。鉛直波力は水平板間隔が狭くなると大きくなる。特に水平スリットが無い M-3 模型の場合は、マイナス側（上向き）の鉛直波力が著しく大きくなる。このことから、水平スリットは鉛直波力低減に効果があることがわかる。さらに、V 型遊水部の奥行の違いによる鉛直波力の相違を図 13. 17 に示す。鉛直波力は、V 型遊水部の奥行による影響は少なく、無次元波力にして 0.2 程度となる。

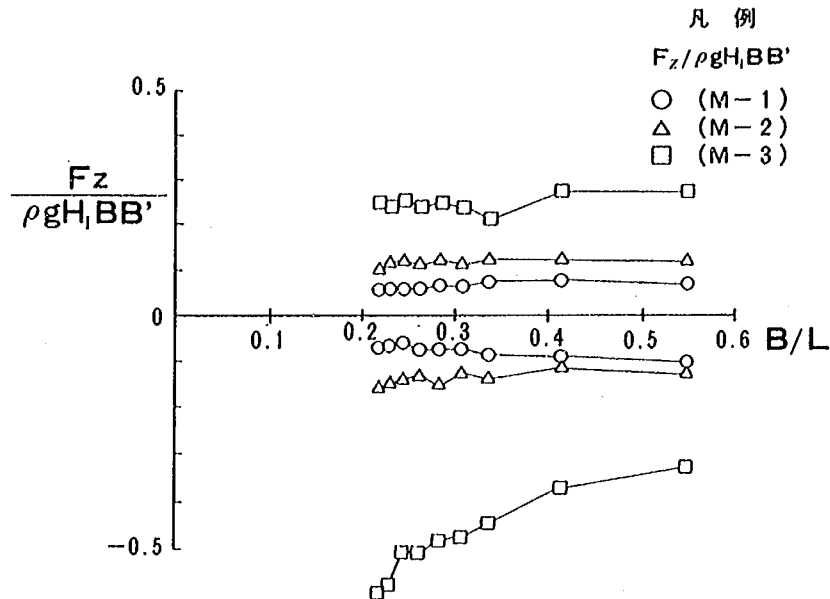


図 13. 16 水平板間隔をパラメータとした無次元鉛直波力と B/L の関係
 ($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

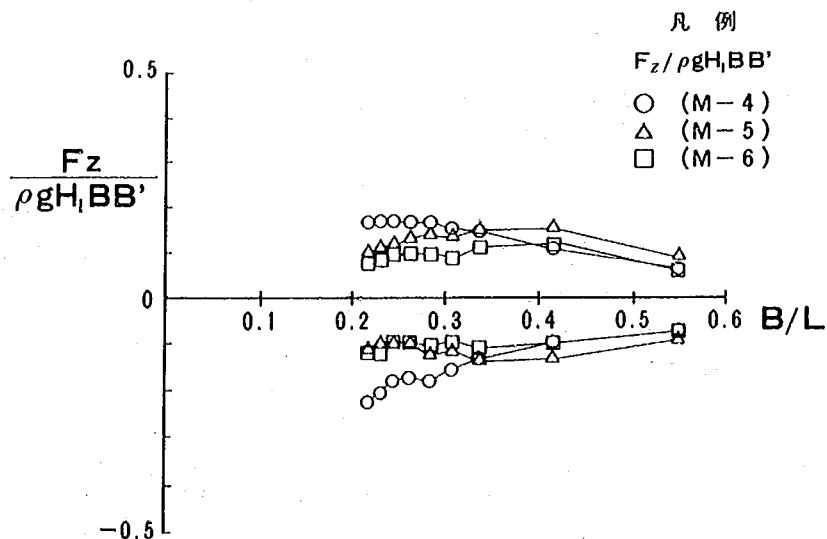


図 13. 17 V 型遊水部の奥行をパラメータとした無次元鉛直波力と B/L の関係
 ($H_0 = 8 \text{ cm}$, $h_2/h = 0.2$)

13. 3. 3 不規則波実験による透過率、反射率及びエネルギー損失率の検討

不規則波実験と、規則波実験によって得られた柱式全体模型の透過率、反射率を図 13. 18, 13. 19 に

示す。規則波実験と不規則波実験の結果はよく一致している。ここに示した不規則波の透過率，反射率は次式で定義される見かけの透過率 K_T' ，反射率 K_R' と呼ばれるものである。

$$K_T' = \sqrt{S_T(f) / S_I(f)} \quad (13.7)$$

$$K_R' = \sqrt{S_R(f) / S_I(f)} \quad (13.8)$$

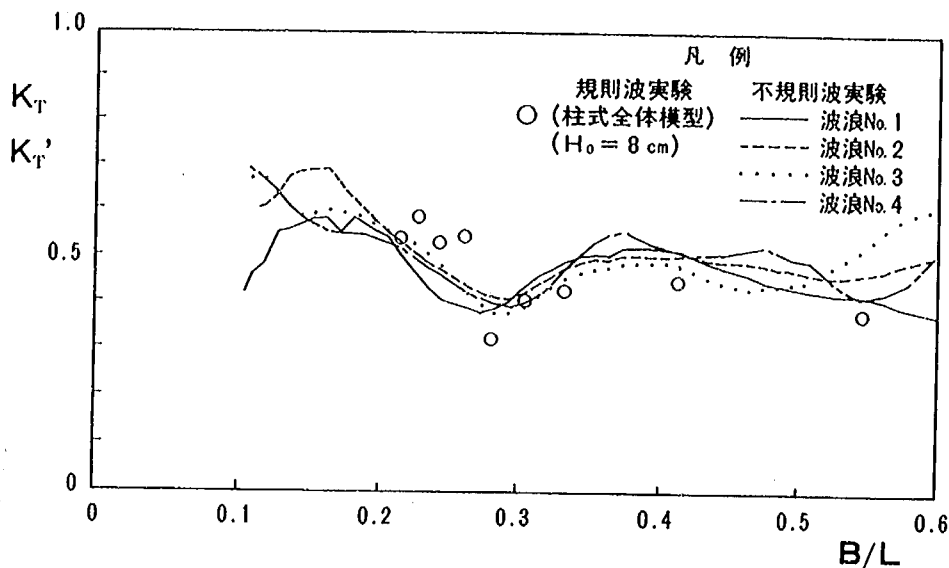


図 13.18 柱式全体模型の規則波と不規則波における K_T , K_T' と B/L の関係 ($h_2/h = 0.2$)

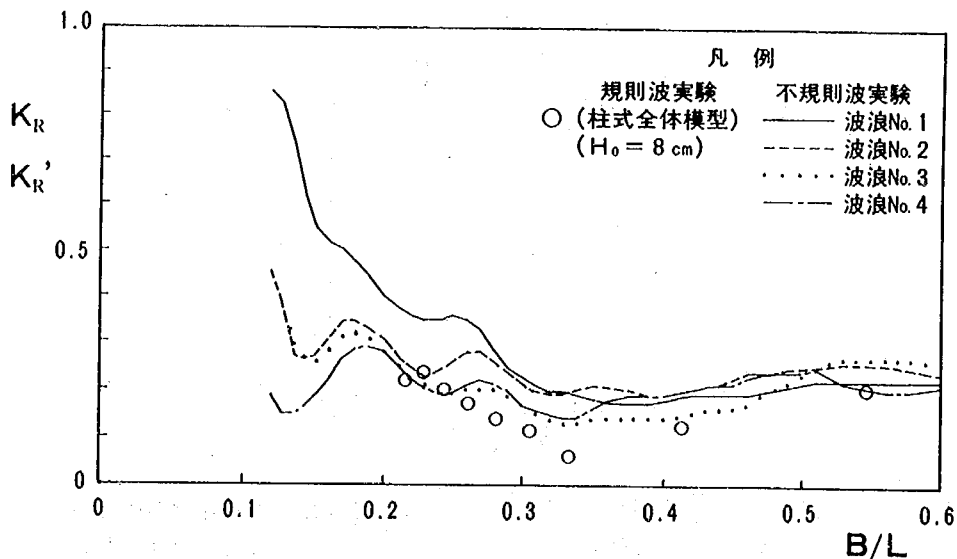


図 13.19 柱式全体模型の規則波と不規則波における K_R , K_R' と B/L の関係 ($h_2/h = 0.2$)

次に，式 (13.3) で示した不規則波の有義波高比による透過率 K_T ，式 (13.1) で示した波のエネルギー比による透過率 K_{TE} ，及び式 (13.2) で示した反射率 K_R を図 13.20，13.21 に示す。透過率 K_T ， K_{TE} の値はよく一致し， $B/L_{1/3}$ の増加に伴って約 0.55 ～ 0.45 まで緩やかに減少する。また，柱式全体模型の反射率 K_R は $B/L_{1/3}$ によらず約 0.25 を示し，壁式全体模型の反射率は約 0.3 を示す。

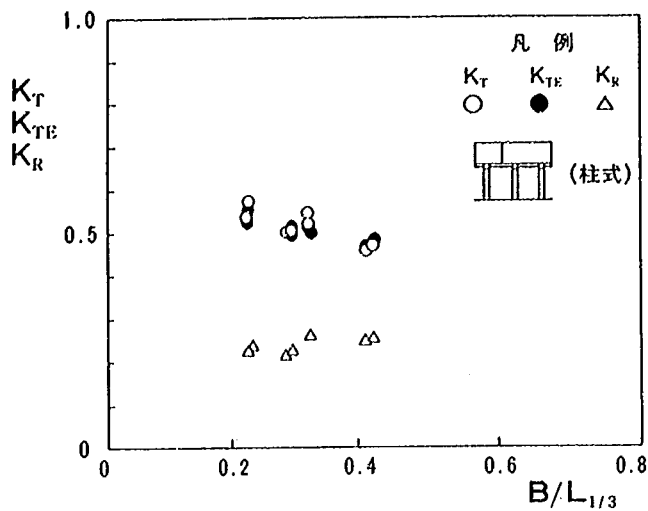


図 13.20 柱式全体模型の不規則波における K_T , K_{TE} , K_R と $B/L_{1/3}$ の関係 ($h_2/h = 0.2$)

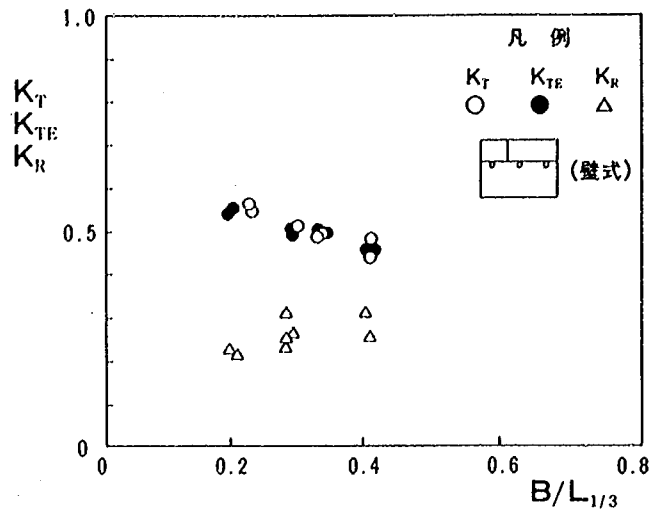


図 13.21 壁式全体模型の不規則波における K_T , K_{TE} , K_R と $B/L_{1/3}$ の関係 ($h_2/h = 0.2$)

次に、式 (13.5), (13.6) で示されるエネルギー損失率を柱式及び壁式全体模型について図 13.22, 13.23 に示す。エネルギー損失率 K_L^2 , K_{LE}^2 はよく一致し、 $B/L_{1/3}$ の増加に伴って約 0.6 ~ 0.7 まで緩やかに増大することがわかる。

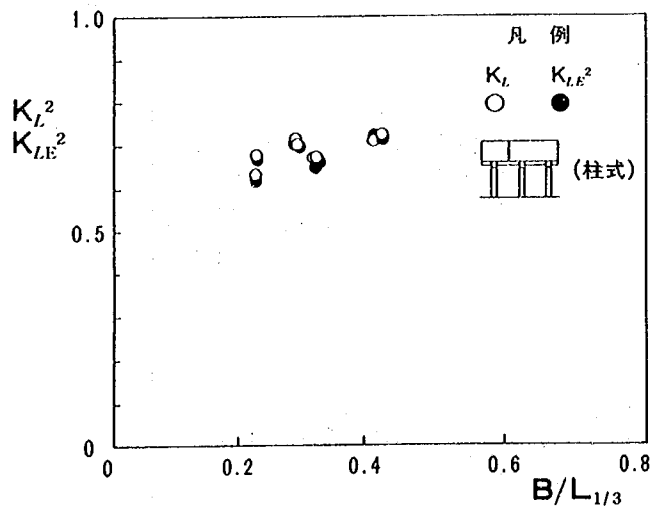


図 13.22 柱式全体模型の不規則波における K_L^2 , K_{LE}^2 と $B/L_{1/3}$ の関係 ($h_2/h = 0.2$)

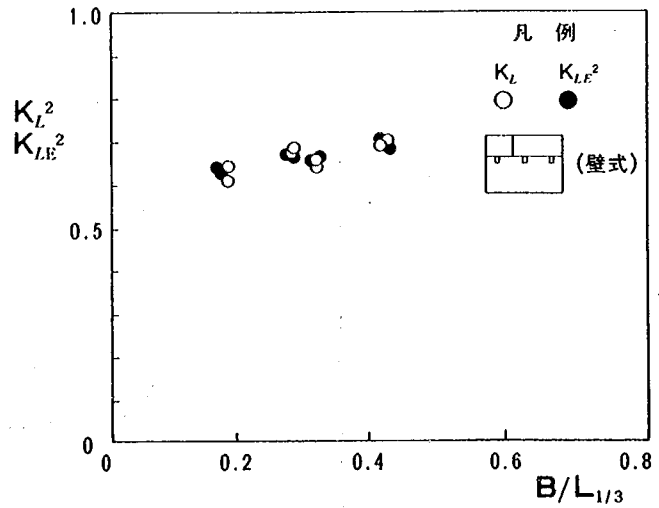


図 13.23 壁式全体模型の不規則波における K_L^2 , K_{LE}^2 と $B/L_{1/3}$ の関係 ($h_2/h = 0.2$)

13.4 結 論

複合消波構造物の 2 次元水理模型実験を実施し、水理学的特性及び力学的特性について以下のような結論を得た。

- ① 水平板間隔を狭くすると透過率は小さくなり、反射率は大きくなる。
- ② Y型垂直板の収斂機能によると、 $B/L = 0.3 \sim 0.55$ の範囲で透過率は約 0.1 小さくなり、 $B/L = 0.23 \sim 0.42$ の範囲で反射率は最大 0.15 小さくなる。
- ③ V型遊水部の機能が全くない場合に比較して、V型遊水部の奥行が浅い場合は B/L が大きくなると、また、奥行が深い場合は B/L が小さくなると透過率が小さくなる。反射率には顕著な差はない。
- ④ 全体模型は、 $B/L = 0.22 \sim 0.55$ の範囲で透過率 0.6 以下、反射率 0.25 以下の値を示す。また、エネルギー損失率は $B/L = 0.27 \sim 0.55$ の範囲で 0.8 以上を示す。
- ⑤ 水平板間隔が狭くなると水平、鉛直波力は大きくなる。また、V型遊水部の奥行が深くなると水平波力は大きくなるが、鉛直波力は変化しない。
- ⑥ 不規則波実験における見かけの透過率、反射率は、規則波実験の結果とよく一致する。
- ⑦ 不規則波実験における有義波高比とエネルギー比から求めた透過率はよく一致し、 $B/L_{1/3}$ の増加に伴って 0.55 から 0.45 まで滑らかに減少する。また、反射率は $B/L_{1/3}$ による変化は少なく約 0.3 を示す。
- ⑧ 不規則波実験におけるエネルギー損失率は、 $B/L_{1/3}$ の増加に伴って約 0.6 ～ 0.7 まで滑らかに増大する。

謝 辞

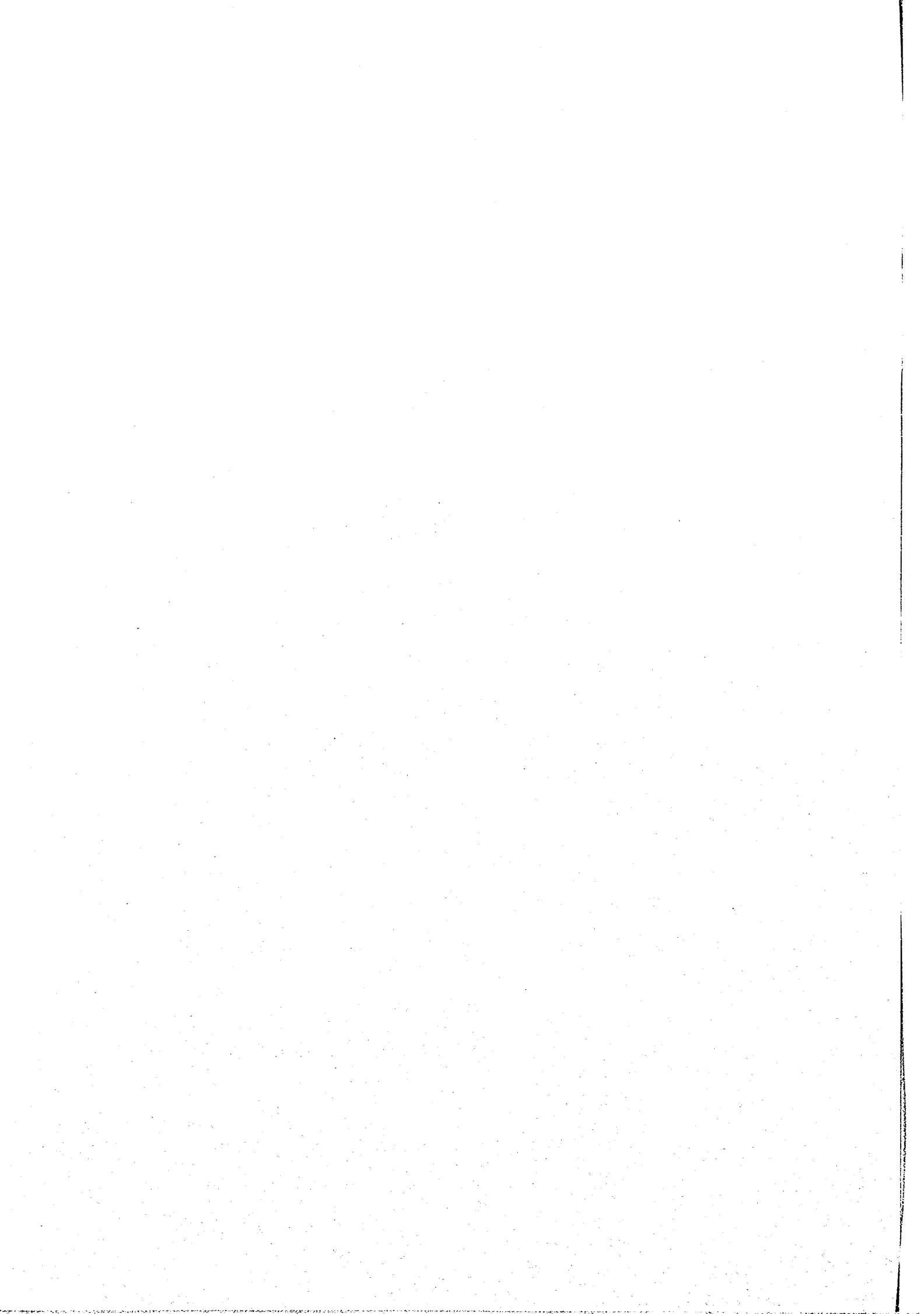
本研究の水理模型実験およびデータ処理・解析にあたり全面的に御協力、御指導を頂いた日本大学理工学部海洋建築工学科・増田 光一助教授（工博）、並びに、日本大学理工学部研究所・林 秀郎研究生（工博）に感謝致します。

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 ～ 105，1987.
- 2) 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（2），土木研究所資料，第 2510 号，pp. 33 ～ 44，1987.
- 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，pp. 1 ～ 24，1976.
- 4) 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），港研資料，No 516，pp. 1 ～ 39，1985.

第14章 ハイブリット式消波構造物の 水理特性に関する研究

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
		山本	幸次
新日本製鐵株式會社鉄構海洋事業部		山本	諄
		盛高	裕生
		木村	哲夫
		高橋	陽一
戸田建設株式会社土木技術開発室		北村律太郎	
		梅田	宏
		添田	弘基
		西牧	均
		佐藤	敏文



14.1 まえがき

本研究では、透過性の鉛直壁と水平板を組み合わせた消波構造物（ハイブリット式消波構造物）について検討する。これまでの研究^{1), 2)}で、この構造物の消波効果は、鉛直板および水平板の空隙率と鉛直板の吃水深に大きく依存することが明らかになった。すなわち、吃水深を深くするほど、また空隙率を小さくするほど、透過率は小さくなる。

ここでは、構造物の吃水比と空隙率を一定として、空隙寸法、形状が消波特性、波力および波圧分布に及ぼす影響を調べた。また、水平板の設置水深、鉛直板の天端高が消波特性、波力および波圧分布に及ぼす影響についても調べた。

14. 2 実験方法

実験は前報¹⁾と同様に建設省土木研究所波浪実験棟内の不規則波造波水路(図 14.1)を用いて行った。水路は長さ 142 m, 幅 0.6 m, 高さ 1.4 m である。波浪条件は, 現地スケールで周期 5 ~ 14 秒, 波形勾配 0.012 ~ 0.060 とした。これらをフルード相似のもとで 1/25 に縮尺し, 表 14.1 に示す波浪条件を選定した。

実験に用いた模型は単一消波板および2枚の鉛直消波板の間に水平板を持った複合消波板とした。2つの模型に共通する構造諸元は、吃水比が $h_2 / h = 0.7$ 、鉛直壁の空隙率 $\varepsilon = 0.2$ である。

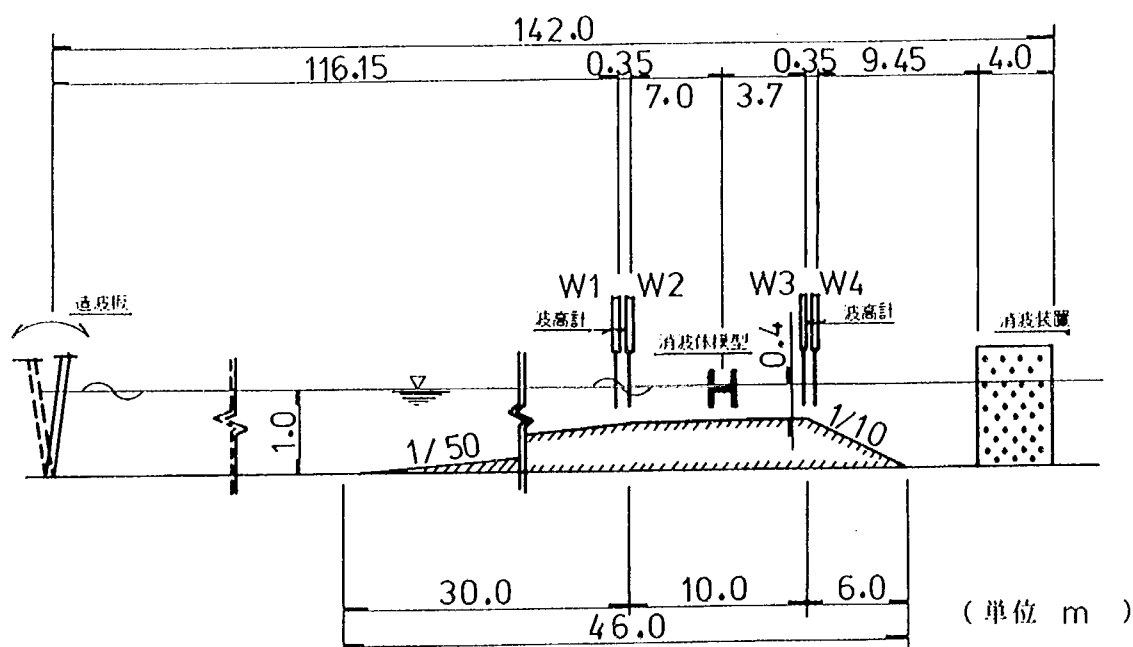


図 14.1 実験装置

表 14.1 波浪条件

Wave No.	周 期 T (sec)	沖波波高 H _o (cm)	沖波波長 L _o (cm)	沖波波形 勾 配 H _o /L _o	波 高 H (cm)	波 長 L (cm)	波形勾配 H/L (cm)
W 1	1.0	3.7	156	0.024	3.5	146	0.024
W 2	1.2	5.1	224	0.023	4.7	194	0.024
W 3	1.2	7.7	224	0.034	7.0	194	0.036
W 4	1.2	10.2	224	0.045	9.3	194	0.048
W 5	1.4	6.2	306	0.020	5.7	239	0.024
W 6	1.4	9.4	306	0.031	8.6	239	0.036
W 7	1.4	12.5	306	0.041	11.5	239	0.048
W 8	1.4	15.6	306	0.051	14.3	239	0.060
W 9	1.6	7.3	399	0.018	6.8	283	0.024
W 10	1.6	10.9	399	0.027	10.2	283	0.036
W 11	1.6	14.6	399	0.037	13.6	283	0.048
W 12	2.0	4.5	624	0.007	4.4	369	0.012
W 13	2.0	9.1	624	0.015	8.9	369	0.024
W 14	2.0	13.5	624	0.022	13.3	369	0.036
W 15	2.8	5.8	1223	0.005	6.4	535	0.012
W 16	2.8	11.6	1223	0.009	12.8	535	0.024

単一消波板模型を用いた実験では、空隙の形状、寸法および消波板の板厚が消波特性、波力および波圧分布に及ぼす影響を検討した。空隙の形状は、円孔、縦スリットおよび横スリットとした。空隙寸法 D は、空隙形状が円孔の場合孔径で、スリットの場合スリット幅で代表させた。実験で用いた模型の諸元を表 14.2 に示す。

複合消波板模型を用いた実験では、単一消波板模型の場合の調査項目以外に、天端高、水平板設置水深が消波特性、波力および波圧分布に及ぼす影響を検討した。実験で用いた各模型の諸元を表 14.3 に示す。

波高は 1/50 の勾配斜面の後端、水深 0.4 m の地点に 35 cm の間隔をおいて 2 台、水深 0.4 m の水路床の後端に 2 台、計 4 台の波高計を設置して測定した (図 14.1 参照)。波高測定は消波体模型からの反射波が沖側の波高計に到達し、安定してから開始し、20 秒間行った。反射率は沖側の 2 本の波高計によって測定された記録を、合田ら³⁾の方法により入射波と反射波に分離して求めた。透過率は消波装置からの反射の影響を受けるため、消波体岸側の 2 本の波高計の計測値をもとに、反射率と同様の方法により透過波と消波装置からの反射波に分離して求めた。

表 14.2 模型条件 (単一消波板)

Model No.	模型形状	D (cm)	b (cm)	b/D	h_2/h	ht (cm)
C 1	円孔	0.5	2.5	5.00	0.7	20.0
C 2		1.0	2.5	2.50	0.7	20.0
C 3		3.0	2.5	0.83	0.7	20.0
C 4		3.0	5.0	1.67	0.7	20.0
C 5		5.0	2.5	0.50	0.7	20.0
S 1	縦スリット	0.4	2.5	6.25	0.7	20.0
S 2		1.2	2.5	2.08	0.7	20.0
S 3		2.0	2.5	1.25	0.7	20.0
S 4	横スリット	1.2	2.5	2.08	0.7	20.0
S 5		0.4	2.5	6.25	0.7	20.0

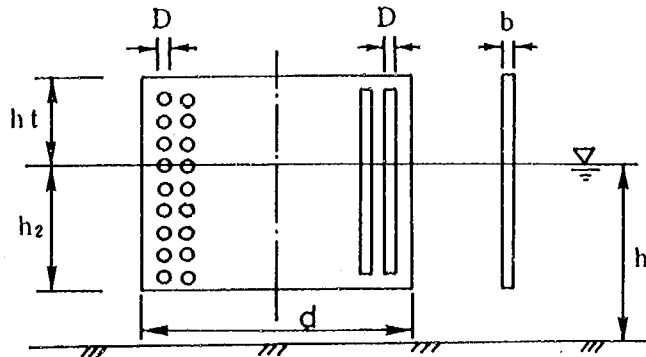
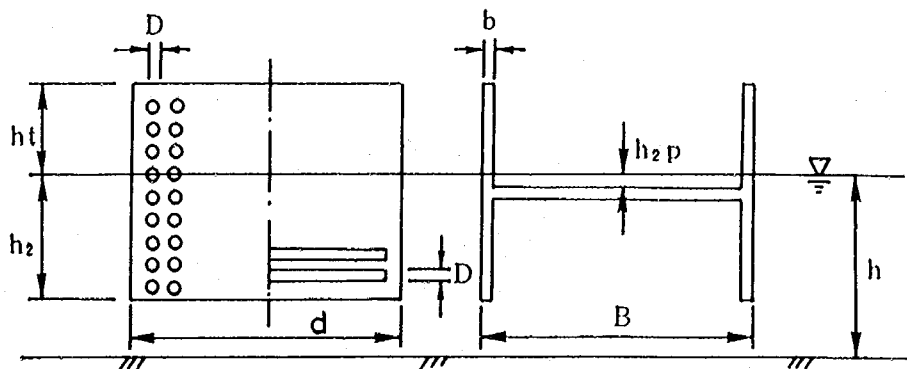


表 14.3 模型条件 (複合消波板)

Model No.	模型形状	D (cm)	b (cm)	b/D	B/h	h_2/h	$h_2 p/h$	ht (cm)
CN0	H型 (円孔)	3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.0	20.0
CN1		3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.1	20.0
CN2		3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.2	20.0
CN3		1.0	2.5	2.50	1.200	0.7	0.1	20.0
CN4		3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.3	20.0
CB1		3.0	2.5	0.83	1.875	0.7	0.1	20.0
SN1	H型 (スリット)	1.2	2.5	2.08	1.200	0.7	0.1	20.0
CN1S1	越波型	3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.1	8.0
CN1S2		3.0	2.5	0.83	1.200	0.7	0.1	5.0



消波板の前面板および背面板は図 14.2 に示すようにそれぞれ 4 個のロードセルを介して鋼製の治具に取り付け、前面板の水平波力 F_{xf} 、背面板の水平波力 F_{xr} を測定した。また複合消波板における水平板は鋼製治具に直接取付けた。模型を取り付けた鋼製の治具は上部で 3 分力計に固定し、水平波力 F_x 、鉛直波力 F_z 、モーメント M_y を測定した。測定した波力は入射波高 H 、消波体面積（静水面下の水平方向投影面積 $A_x = d \cdot h_2$ 、鉛直方向投影面積 $A_z = d \cdot B$ 、ただし d は鉛直板の水路幅方向の長さ）で無次元化し、次式より波圧強度（ f_x 、 f_z ）を求めた。

$$f_x = F_x / (w_0 \cdot H \cdot A_x) \quad (14.1)$$

$$f_z = F_z / (w_0 \cdot H \cdot A_z) \quad (14.2)$$

ここに、 w_0 ：水の単位体積重量（ kgf/cm^3 ）である。

波圧計は単一消波板では沖側壁面に 6 カ所、複合消波板では、前面板の沖側に 3 ヶ所、水平板上下面にそれぞれ 3 カ所、背面板の沖側に 3 カ所の計 12 カ所に配置した（図 14.3）。単一消波板では前述の波圧強度と比較するために、波圧分布の平均値 p_x を空隙の影響を考慮して、以下のように計算した。

$$p_x = \left(\sum_{i=1}^6 p_i / 6 \right) \cdot (1 - \epsilon) \quad (14.3)$$

ここに p_i は波圧計測定値（ kgf/cm^3 ）である。

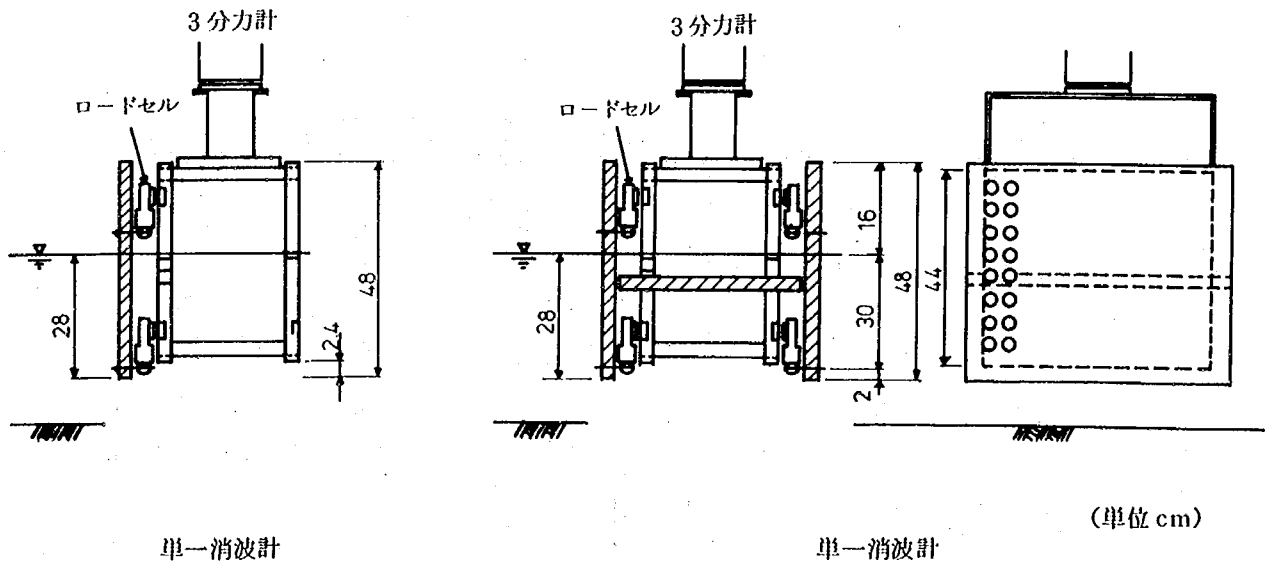


図 14.2 模型及び取り付け治具

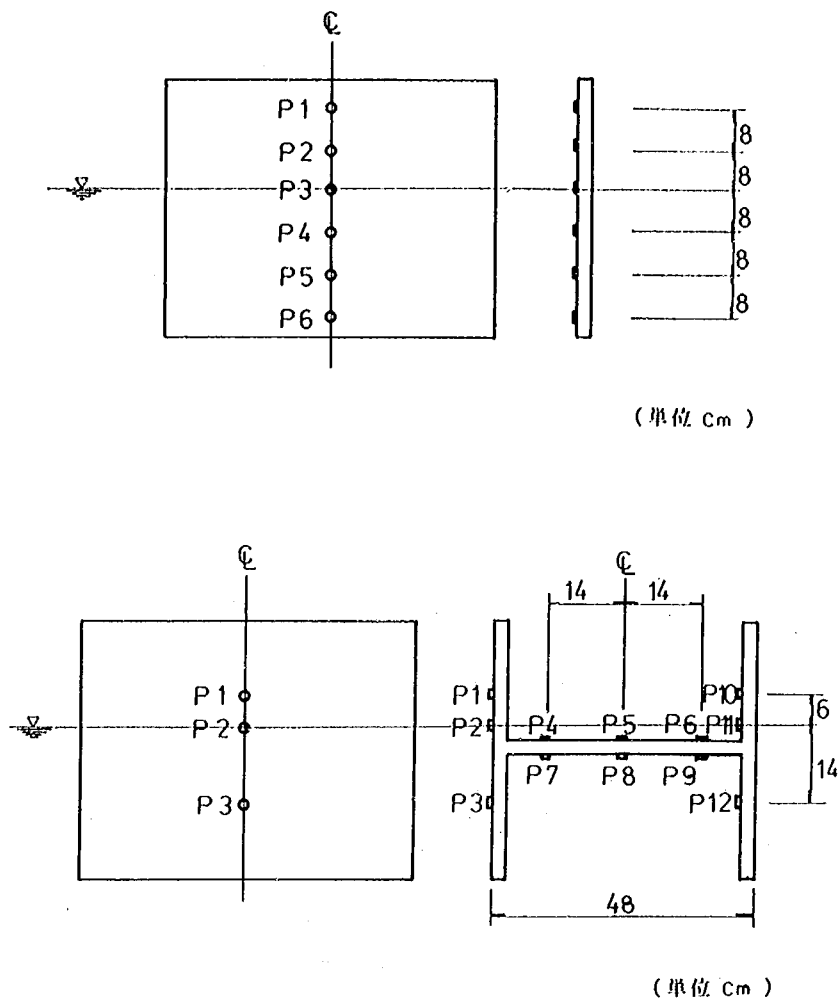


図 14.3 波圧計の配置

14. 3 実験結果

14. 3. 1 空隙寸法と消波特性の関係

(1) 単一消波板

空隙を持った鉛直板の消波特性が H/L の影響を受けることは既に明らかになっている^{2), 4)}。図 14. 4, 14. 5 に空隙形状が円孔のもの（円孔モデル：C），スリットのもの（スリットモデル：S）の H/L と K_T , K_R の関係を示す。なお図 14. 5 では前報¹⁾の実験結果も合わせて表示した。どのモデルにおいても H/L が増加すると K_T は減少し， K_R は増加している。図 14. 4 に示す円孔モデルでは波形勾配によらず空隙寸法が大きいモデル（C 3： $b/D = 0.83$ ）の方が K_T は大きく， K_R は小さい。一方，横スリットモデル（図 14. 5）では空隙寸法の違いによる K_T , K_R の差は認められない。これは縦スリットモデルでも同じ傾向であった。

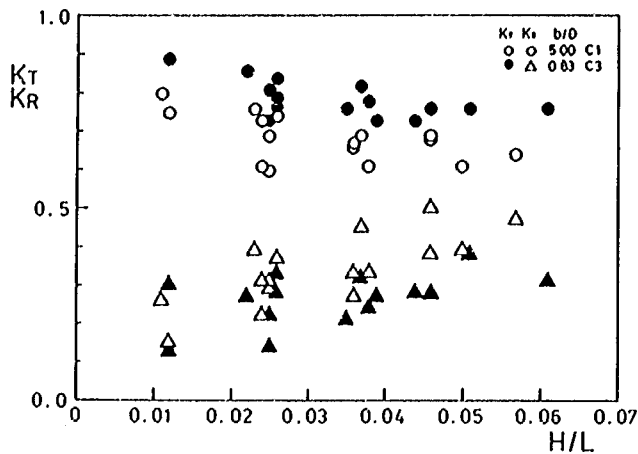


図 14.4 円孔モデルの H/L と K_T , K_R の関係

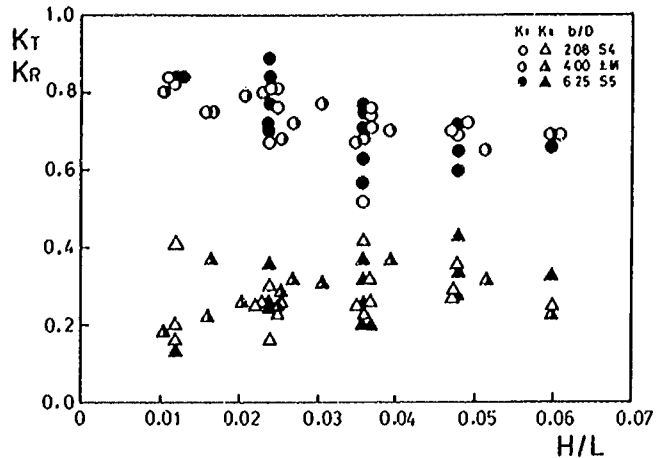


図 14.5 横スリットモデルの H/L と K_T , K_R の関係

図 14.6 は縦スリットと横スリットモデルについて波浪条件が同じ場合の K_T を比較したものである。横スリットが縦スリットよりも K_T は小さく、最大で10%程度小さい値を示している。既往の実験⁹⁾では、空隙率、形状が同じ場合、 K_T , K_R とともに横スリットの方が縦スリットよりも数%小さい値を示すことが認められており、本実験結果と傾向は一致する。

榎木・岩田⁵⁾は、円孔状の空隙を持った消波体によるエネルギー消費を、波が空隙を通過する際に生じると考え、 b/D と消波特性の関係について論じた。ここに D は孔径、 b は板厚である。すなわち、空隙率が0.186の場合、 b/D が増加すると K_T は小さくなり、 K_R は高くなる。また、小川・時川⁴⁾によれば、空隙率が0.2の場合 b/D を0.0575から0.23に変えても K_T , K_R の変化はほとんど認められなかった。今回の実験の b/D は円孔モデルでは0.83から5.0、スリットモデルでは1.25から6.25の範囲であり、榎木・岩田の実験によれば、 b/D による K_T , K_R の変化が大きな範囲である。図 14.7, 14.8 は円孔、縦・横スリットモデルの b/D と K_T , K_R の関係を示す。図 14.7 に示す円孔モデルで

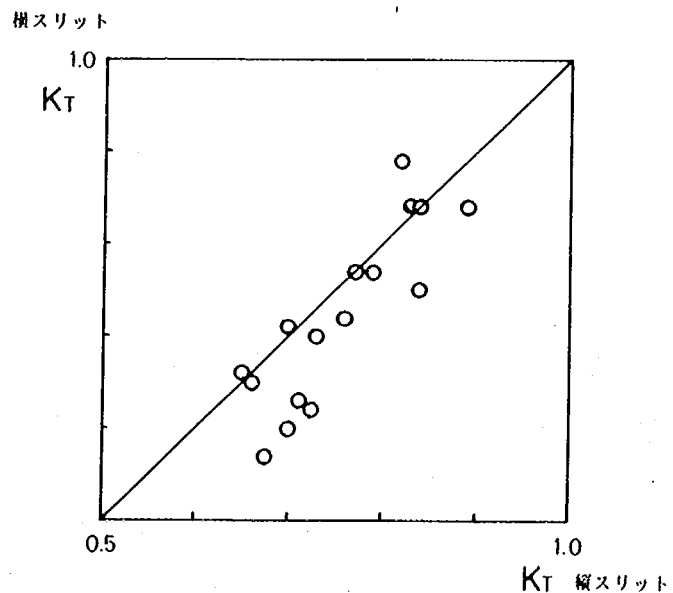


図 14.6 縦スリットモデルと横スリットモデルの K_T の比較

は b/D の増加 (孔径の減少) にともない K_T は減少し, たとえば b/D が 0.83 から 2.5 へ増加すると K_T は約 5% 減少する。反射率は b/D にあまり依存せず, ほぼ一定値をとる。また, 図 14.8 に示す縦・横スリットモデルとも b/D の増加 (スリット幅の減少) にしたがって K_T は減少するが, K_R はあまり変化しない。縦・横スリットとも b/D と K_T , K_R の関係はほぼ同様である。

以上のように, 今回の実験結果では b/D による K_T , K_R の変化の割合が既往の実験的研究に比べると小さかった。この原因の一つは, 既往の実験が吃水比 $h_2/h = 1.0$ で行われたのに対し, 今回の実験モデルの吃水比は 0.7 であり, 消波板下部の開口部からの波の透過があったためと考えられる。

次に, 空隙寸法 D を入射波高 H によって無次元化したパラメータ H/D と消波特性の関係を検討する。樺木・岩田⁵⁾ の実験によれば, H/D の増加にともない K_T は減少し, K_R は増加する。円孔モデル, 縦スリットモデルの H/D と K_T , K_R の関係を図 14.9 に示す。円孔モデルでは H/D の増加にともない K_T は減少し, K_R はほぼ一定の割合で増加している。ただし H/D が 5 以上は孔径が 0.5 cm のモデル, 5 以下は孔径が 3.0 cm のモデルの実験データである。同一の孔径でみると, H/D による K_T の変化は少ない。したがって,

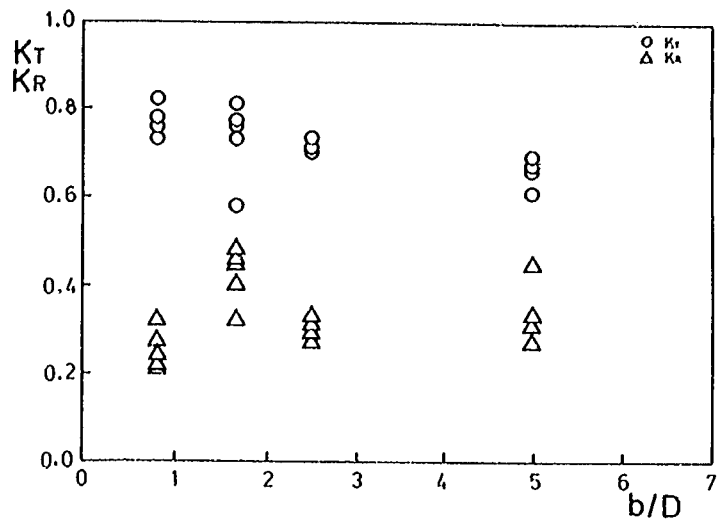


図 14.7 円孔モデルの b/D と K_T , K_R の関係 ($H/L = 0.036$)

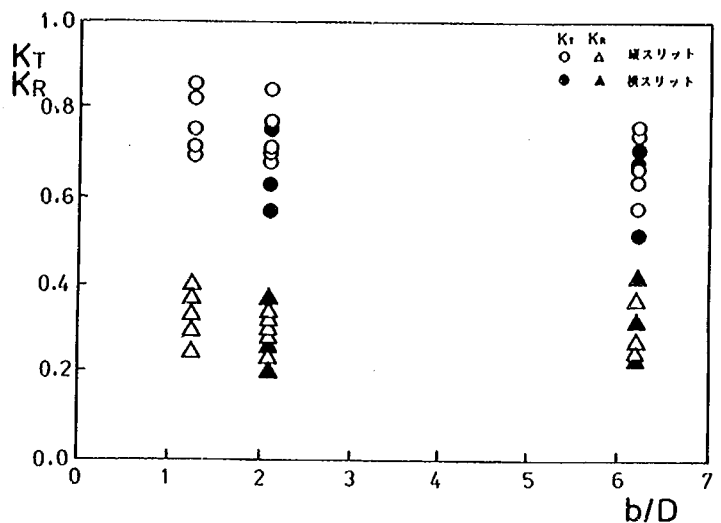


図 14.8 縦, 横スリットモデルの b/D と K_T , K_R の関係 ($H/L = 0.036$)

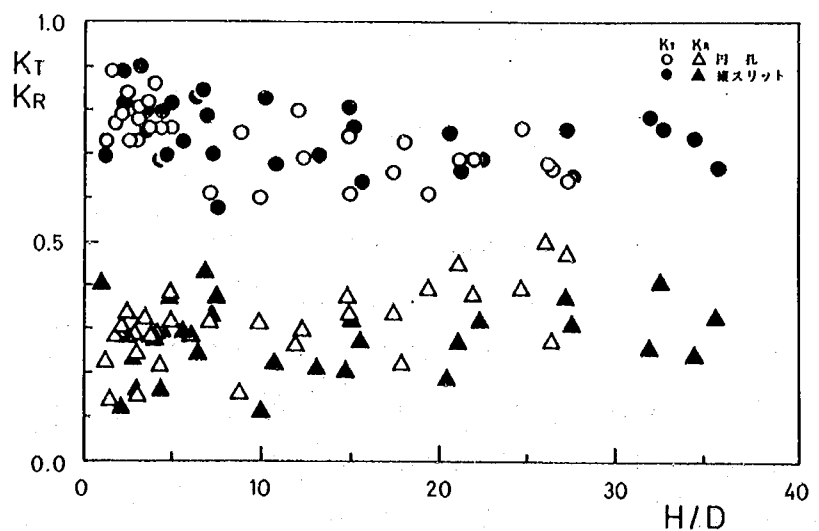


図 14.9 円孔モデル, 縦スリットモデルの H/D と K_T , K_R の関係

K_T の減少は孔径が小さくなったことによるものと考えられる。縦スリットモデルの K_T は H/D の増加とともにほぼ一定の割合で減少するのに対し、 K_R は H/D が増加してもほとんど変化しない。

(2) 複合消波板

図 14.10 は複合消波板の円孔モデルの場合について K_T 、 K_R と b/D の関係を B/L をパラメータとして示したものである。 b/D を 0.83 から 2.5 に大きくすると、 K_T は減少するが K_R は明瞭な傾向を示さない。 b/D を 0.83 から 2.5 にした時、単一消波板の K_T は約 5% 減少したのに対して、複合消波板の K_T は約 15% 減少しており、消波板を複合したことにより孔径の影響が大きくなっている。

空隙形状の違いによる、 B/L と K_T 、 K_R の関係を図 14.11 に示す。円孔モデル、横スリットモデルの b/D はそれぞれ 2.08、2.5 である。空隙の形状によらず、 B/L の増加とともに K_R は増加し、 K_T は直線的に減少する。これより空隙形状は B/L に比べて複合消波板の消波特性に与える影響が小さいことがわかる。

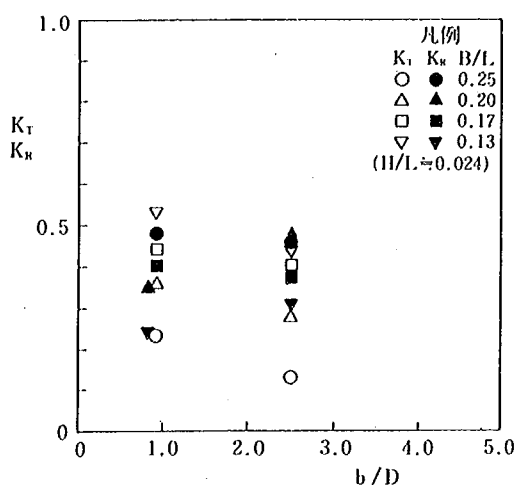


図 14.10 円孔モデルの b/D と K_T 、 K_R の関係 ($h_2 R/h = 0.1$)

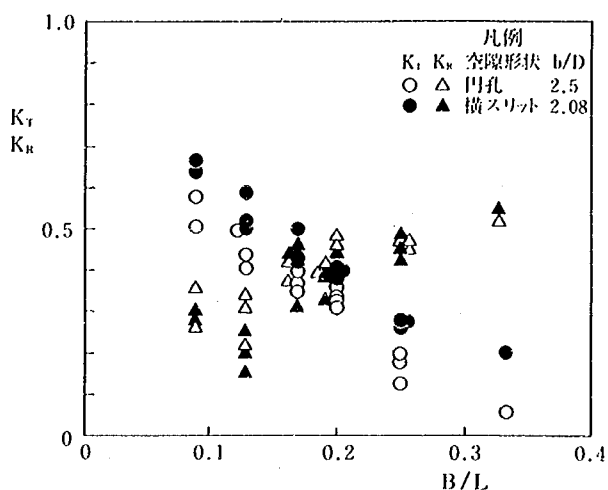


図 14.11 円孔モデルと横スリットモデルの B/L と K_T 、 K_R の関係 ($h_2 p/h = 0.1$)

14.3.2 空隙寸法と波力の関係

(1) 単一消波板

空隙を持った鉛直板の消波特性は H/L の影響を受けることは前節に述べた。そこで、波力についても H/L の効果が重要と考え、円孔モデルの H/L と水平波力の波圧強度 f_x の関係を整理した (図 14.12)。明瞭な傾向はみられないが、空隙寸法が小さいモデル (C1) の方が f_x が大きくなっている。縦・横スリットモデルでも H/L に対して、明瞭な傾向はみられなかった。

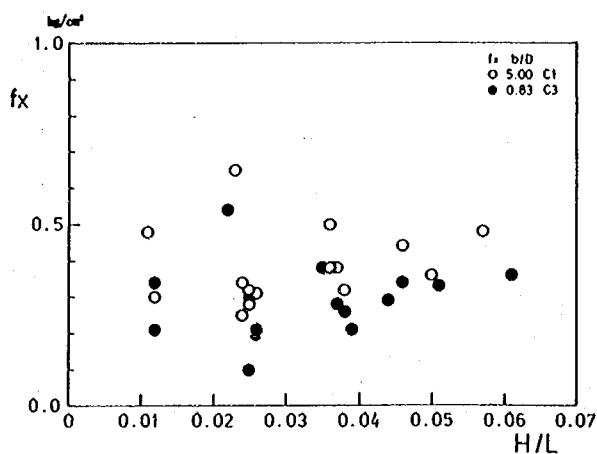


図 14.12 円孔モデルの H/L と f_x の関係

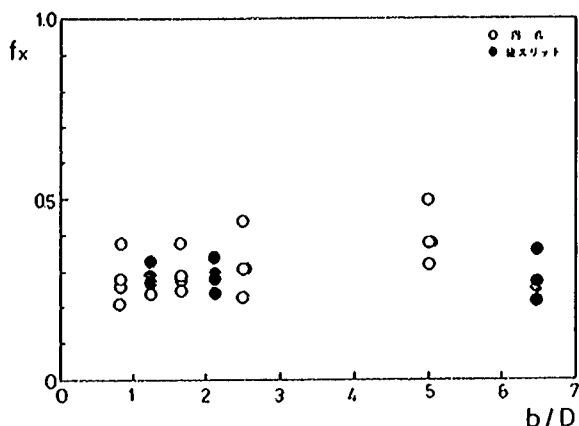


図 14.13 円孔モデル，縦スリットモデルの b/D と f_x の関係

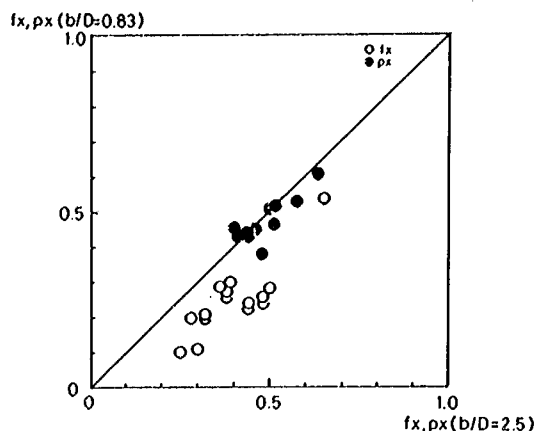


図 14.14 円孔モデルの f_x , p_x の孔径による比較

消波特性と空隙寸法は b/D により関連づけられることは前節で述べた。そこで b/D と f_x の関係を図 14.13 に示す。円孔モデルでは b/D の増加に従い f_x は増加し、たとえば b/D が 0.83 から 2.5 への増加で f_x は約 15% 増加する。しかし縦スリットモデルは円孔モデルに比べて b/D の増加にともなう f_x の変化の割合は小さい。横スリットモデルも同様である。

以上のように、円孔モデルと縦・横スリットモデルで波力特性に相違がみられるためこの原因について検討した。消波体を受ける波力は消波体前面が受ける波圧と、消波体の空隙部を通過する際に発生する抗力の合力である。孔径が 1.0 cm ($b/D = 2.50$) と 3.0 cm ($b/D = 0.83$) の円孔モデルについて、波浪条件が同じ場合の f_x と p_x を比較したのが図 14.14 である。 f_x は孔径によらずほぼ同じ値を示している。これは、消波体を受ける抗力が増加したためと考えられる。これに対して、縦・横スリットモデルでは空隙寸法が変化しても f_x , p_x はほぼ同じ値を示している。

(2) 複合消波板

図 14.15 は複合消波板での b/D と f_x , f_z の関係を示したものである。 b/D を 0.83 から 2.5 に大きくすると、 f_x , f_z ともに大きくなる。この時、 f_x は単一消波板と同様に約 15% 増加し、 f_z は約 10% 増加する。また、図 14.10 に示したように K_T は b/D が増加すると減少することから、 b/D をパラメータとして K_T と f_x の相関がみられる。これは、孔径を小さくすると、波が円孔を通過する際の乱れが大きくなり、エネルギー損失が増加して K_T は減少するが、抗力は増加することを意味する。

図 14.16 は B/L と f_x , f_z の関係を示したものである。円孔モデルおよび横スリットモデルの b/D はそれぞれ 2.08, 2.5 である。空隙の形状にかかわらず、 B/L が大きくなると f_x は減少し、 f_z は B/L が 0.17 付近で極大となっている。

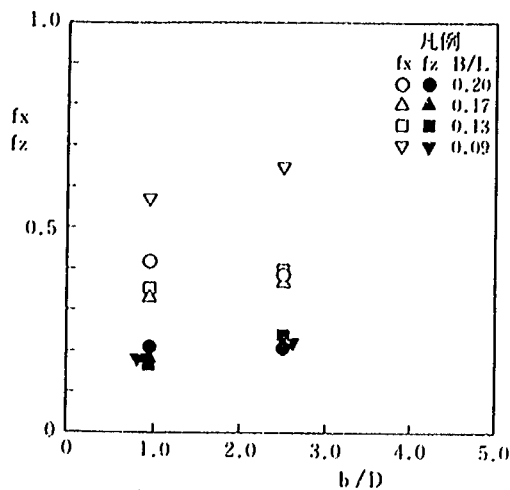


図 14.15 円孔モデルの b/D と f_x , f_z の関係 ($h_2p/h = 0.1$)

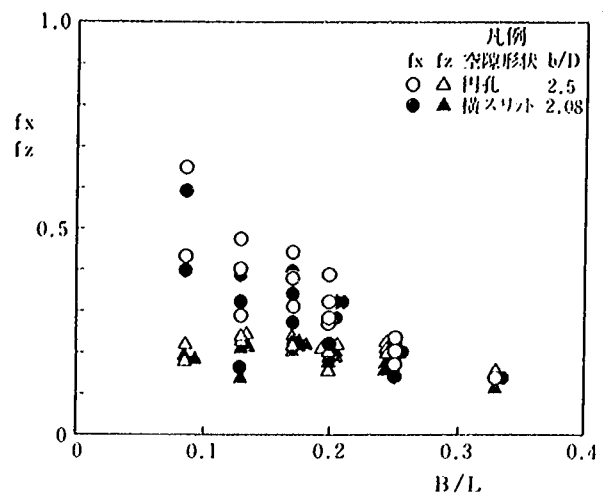


図 14.16 円孔モデルと横スリットモデルの B/L と f_x , f_z の関係 ($h_2p/h = 0.1$)

14. 3. 3 複合消波板の水平設置水深、天端高と消波特性、波力との関係

図 14.17 は h_2p/h_1 と K_T , K_R の関係を示したものである。これまでの実験結果と同様に K_T は h_2p/h が 0.1 で極小値を示している。 h_2p/h を 0 から 0.1 に変化させた場合、 K_T の減少の割合は $B/L = 0.25$ で 33%, $B/L = 0.13$ で 12% であり、平均すると 20% になる。B を一定にした場合、周期の短い波ほど設置水深が深くなると小さくなる。

図 14.18 は、 h_2p/h と f_x と f_z の関係を示したものである。水平板を静水面に設置した場合、 f_z は鉛直下向に比べて鉛直上向が卓越する。これに対して、水面下に設置した場合はほぼ同程度になる。また、

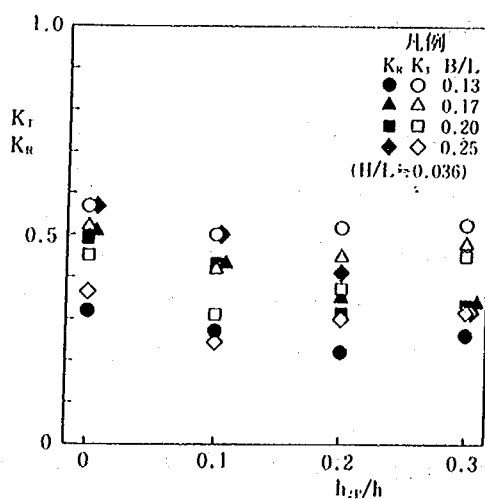


図 14.17 円孔モデルの h_2p/h と K_T , K_R の関係 ($D = 3.0$ cm)

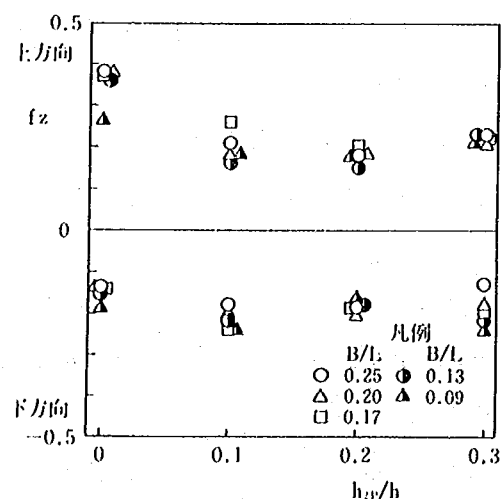


図 14.18 円孔モデルの h_2p/h と f_x , f_z の関係 ($D = 3.0$ cm)

この場合 h_2p/h による f_z の変化は見られない。

図 14.19 は h_2p/h と f_x の関係を示したものである。 h_2p/h が大きくなると f_x は小さくなり、 f_x の変化の割合は B/L が大きな波ほど大きい。

以上の結果から、 $h_2p/h = 0$ の場合、消波および波力特性上一番不利な構造となる。従って、水平板設置水深比は実際の海域での潮位変動を考慮して、干潮時でも水平板が没水するように設定する必要がある。

次に、非越波モデルと越波モデルの K_T , K_R を比較すると、 K_T , K_R とも天端高による差はみとめられなかった。非越波モデルの天端高は $ht = 20\text{cm}$ 、越波モデルの天端高は $ht = 5, 8\text{cm}$ であり、天端高 ht と入射波高 H の比は $ht/H = 0.35 \sim 0.89$ の範囲である。目視観察によると越波の状況は前面板を越波するものと前面板および背面板の両方を越波するものに分かれ、後者の場合の ht/H は 0.35 であった。

図 14.20 は越波モデルと非越波モデルの水平波力を比較したものである。天端高が低くなるほど全体及び前面板水平波力は小さくなるが、背面板の水平波力は変わらない。これは天端高を低くすると波力を受ける面積が減少するためである。また越波モデルと非越波モデルの f_z を比較すると、 f_z は越波モデルの方が若干大きい程度である。

以上の結果から、今回の実験で用いた波浪条件の下では、複合消波板の天端高 ht を $0.35 H$ まで低くしても、消波特性は天端高が高いものとほとんど変わらないことがわかった。またこのとき天端高を低くすると、鉛直波力はやや増加するが、前面水平波力は低減することができた。

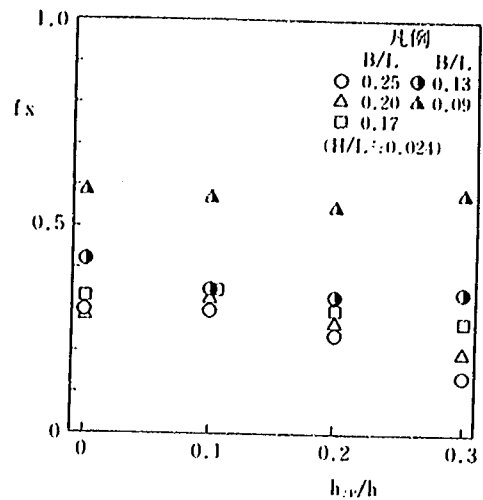


図 14.19 円孔モデルの h_2p/h と f_x の関係 ($D = 3.0\text{ cm}$)

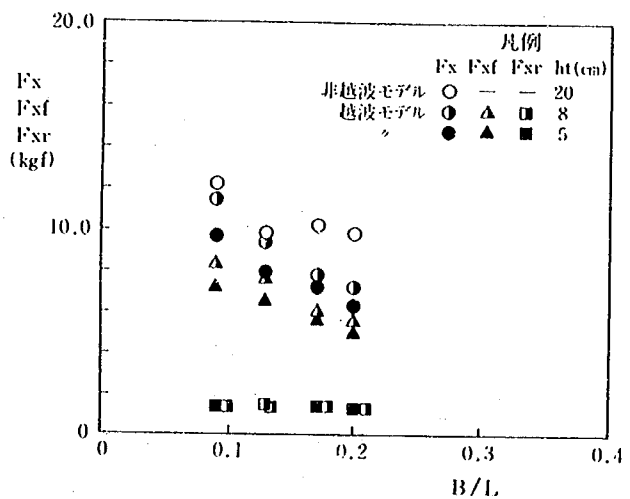


図 14.20 円孔モデルの F_x , F_{xf} , F_r の天端高による比較 ($h_2p/h = 0.1$, $D = 3.0\text{ cm}$)

14. 4 複合消波板の波力特性

消波板の部材設計を行う場合、空隙形状、寸法、 B/L 等に応じた波力特性より各消波板に作用する最大波力を定める必要がある。ここでは、消波板を支える構造体の安定性を検討するために必要な水平鉛直波力の組合せについて調べる。

図 14. 21 は前面板、背面板および水平板にそれぞれ作用する波力と、前面板と背面板の波力を同時刻で加算した水平波力の波形を実験波の周期別に示したものである。実験波周期は 1.2, 1.4, 2.0 秒である。前面板と背面板の波力の正、負はそれぞれ陸方向、沖方向を示し、水平板の波力の正、負はそれぞれ上方向、下方向を示す。周期が 1.2 秒の場合は背面板の波力 (F_{xr}) と水平板の波力 (F_z) のピークがほぼ同時刻に作用している。これに対し、周期が長い 2.0 秒では、加算した水平波力 ($F_{xf} + F_{xr}$) と水平板の波力 (F_z) のピークがほぼ同時刻に作用するようになる。この時、背面板の波力に比べて、前面板の波力の方が卓越している。

以上のことから、構造体の安定性を検討する場合、複合消波板に作用する波力の組合せは、陸方向に水平波力、上方向に鉛直波力の最大値が作用する場合と、沖方向に水平波力、下方向に鉛直波力の最大値が作用する場合の 2 ケースを考える必要がある。

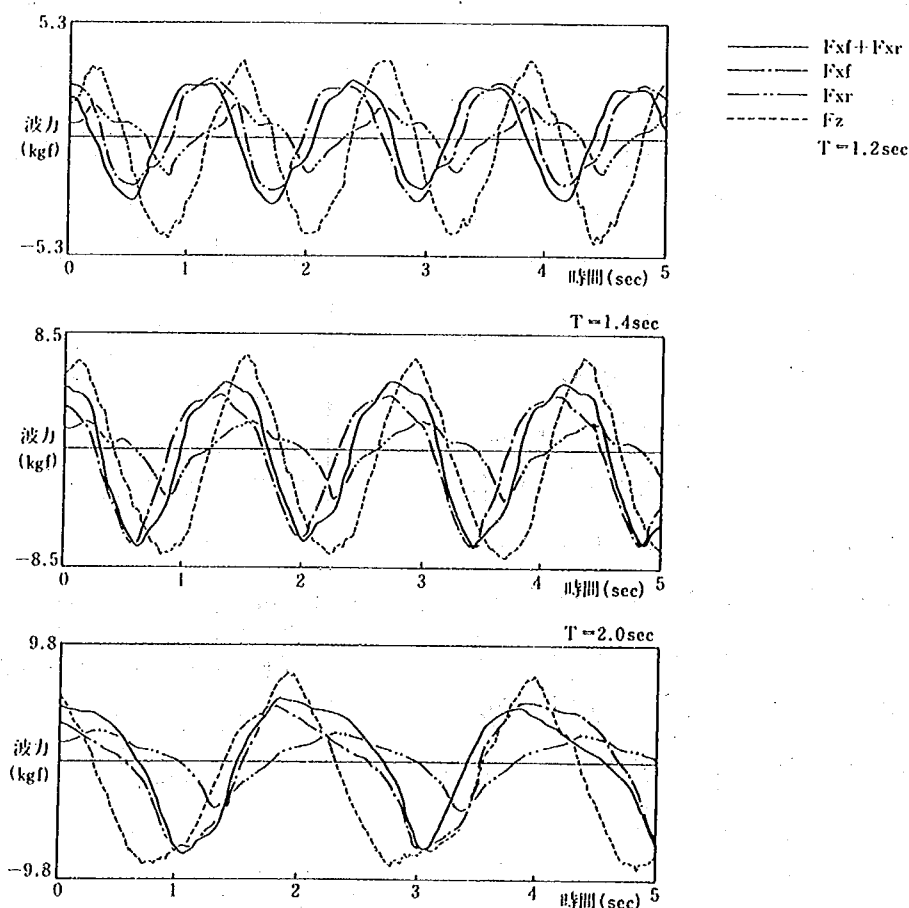


図 14. 21 横スリットモデルの波力の時刻歴 ($h_{2p}/h = 0.1$, $D = 3.0$ cm)

14. 5 結 論

本実験から得られた結果をまとめると以下の通りである。

- ① 空隙寸法は単一消波板、複合消波板とも K_T , K_R に影響を及ぼし、無次元化した空隙寸法 b/D を大きくするにしたがい K_T は減少し、 K_R は増加する。
- ② 単一消波板でのスリットモデルと円孔モデルの空隙寸法が消波特性に及ぼす影響は円孔モデルの方が大きい。
- ③ 単一消波材での縦スリットモデル、横スリットモデルの K_T は同一の波浪条件で比較すると、横スリットモデルの方が小さい。
- ④ 複合消波板の K_T は水平板設置水深比が $h_2/h = 0.1$ で極小となる。
- ⑤ 円孔モデルでは単一消波板、複合消波板とも、孔径の減少とともに水平波力が増加する。また複合消波板の鉛直波力も増加する。
- ⑥ 単一消波板のスリットモデルでは空隙寸法の減少による水平波力の増加はほとんどない。
- ⑦ 複合消波板の水平方向の最大波力は前面板の最大波力とほぼ等しい。

消波特性、波力に関する実験結果から構造諸元について考察すると次のようになる。

- ① 複合消波板の K_T , f_x , f_z は水平板を静水面に設置した場合最大となる。また K_R , f_x は設置水深の増加と共に小さくなる。従って、実海域の潮位変動が水深の20%の場合、水平板設置水深比を平均水面から0.2とすれば、設置水深比は潮位変動により0.1から0.3の間を変動することになり、消波、波力特性上有利な構造となる。設計上、少なくとも水平板は干潮時でも没水するよう注意を払う必要がある。
- ② 複合消波板の天端高 h_t を入射波高 H の0.35としても非越波モデルと同程度の消波特性が得られ、 f_x は低減される。したがって h_t/H を0.35とすれば、非越波モデルに比べて構造体を経済的にすることができる。

14. 6 今後の課題

(1) 砕波力について

複合消波板に作用する砕波力について二次元水路を用いて水理実験を行い、設計波力としての砕波力を把握する。なお今回の実験で天端高 h_t を入射波高 H の0.35としても消波特性はほとんど変わらなかった。そこで景観および波力低減のため、 h_t/H をさらに小さくして消波特性に及ぼす影響を調べるとともに、このときの砕波力を把握する。

(2) 構造について

- ① (1)の結果を踏まえて、天端高を極力小さくしたタイプについてその構造を検討する。
- ② 波力に対する接合部の構造について検討する。接合部としては、杭と構造物、骨組み材と壁材などが考えられる。
- ③ 杭の横方向の変形が大きくなった場合の地盤の水平支持力についても検討を加える。

(3) 施工について

地盤、海象条件に応じた構造物の設置法、基礎の施工法、接合部の施工法について経済的な方法を検討する。

(4) 海浜変形および海底面の洗掘について

複合消波板を設置したことによる周辺の洗掘について検討する。また背後域の海浜変形に対する検討を行う。

14. 7 参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：海域制御構造物に関する共同研究報告書（1），土木研究所資料，No.2454. pp. 5 ~ 27. pp. 107 ~ 119. pp. 121 ~ 131. 1987.
- 2) 建設省土木研究所河川部海岸研究室：海域制御構造物に関する共同研究報告書（2），土木研究所資料，No.2510, pp. 83 ~ 90, 1987.
- 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，港湾技研資料，No. 248, P.24, 1976.
- 4) 小川達彦・時川和夫：多孔型ケーソンタイプ消波防波堤の特性，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 106 ~ 111, 1976.
- 5) 樺木 享・岩田好一郎：多孔壁式鉛直消波岸壁の水理特性に関する二，三の考察，土木学会論文報告集，第220号，pp. 53 ~ 63, 1973.
- 6) 井田康夫・久保弘一：スリット構造による波浪の減衰作用について，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 545 ~ 549, 1975.

第15章 駿河湾海洋施設周りの洗掘実態

建設省土木研究所海岸研究室 室 長 宇多 高明

建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所

調査課長 堤 博志

建設省土木研究所海岸研究室 研 究 員 村井 禎美

部外研究員 藤原 隆一

15.1 まえがき

建設省では、駿河湾に面した静岡県大井川町の沖合約 250 m の地点に海洋技術総合研究施設（以下、海洋施設と呼ぶ）を保有している。海洋施設は、9本の鋼管杭（ $\phi 812.8$ ）を 7.5 m 間隔で正方形に配置した杭式構造物である。この海洋施設周りで大規模な洗掘が生じていることは既に報告したり。本報告では、その後実施した追跡調査の結果を加えて洗掘の実態をさらに詳しく検討する。

15.2 観測方法

洗掘現象は、時間的、空間的に変化するものであり、両者同時に密なデータを取得することは難しい。従って、互いに補完し合うようにデータを取得する必要がある。そこで、洗掘の空間的な広がりや深浅測量によって調べ、一方、地盤の時間的変動は光電式砂面計によって調べることにした。深浅測量は、沿岸方向の測線間隔を 20 m とし、1987 年 2 月 28 日、3 月 26 日に行った。砂面計は、海洋施設の南に面したデッキから約 5 m 沖側の地点に間隔約 5 m で 2 台（St. 1, St. 2）設置し、毎時 1 回地盤高測定を行った。砂面計を設置した地盤の初期高さは、砂面計を設置した 1987 年 2 月 27 日の海洋施設直下の地盤高測定は、次に示す方法で行った。すなわち、海洋施設の指示杭に取り付けられたマッドマット下端（T.P.-7.70 m）にロープを張り、スタッフを用いて海底までの距離を測定した。杭の周り約 50 cm の範囲では、深さ 20 cm 程度の局所洗掘がみられることがあるため、杭の根元（24 点）と各杭の中間地点（12 点）で測定を行い、全測定点の平均値を海洋施設直下の地盤高とした。なお、全測定点の平均値と杭の根元を除いた平均値の差は 10 cm 程度と小さかった。底質特性については深浅測量時にサンプリングを行い、粒度分析を行った。洗掘を引き起こす外力としては波浪、潮流等が考えられる。波浪データについては、音波式高計を用いて静岡県河川工事事務所が定時観測を行っている。また、流況についてはロータ式流速計を施設の直下にロープで固定して測定を行った。流速計センサの高さは T.P.-4.9 m であり、海底上約 4.5 m の位置であった。流速の測定は 10 秒間に 1 回行い、20 分間の平均を 1 データとして記録した。

15.3 調査結果

今回の調査で得られた海底形状を図 15.1 に示す。図には前回測定した 1987 年 7 月 1 日の海底形状も示した。X, Y はそれぞれ沿岸、岸沖方向の基準点からの距離である。これより、洗掘の空間的規模は前回と同様に、海洋施設を中心とした半径約 50 m の範囲で生じていることがわかる。また、1987 年 2 月 28 日と 3 月 26 日の測量結果を比べると、T.P.-7 m 以深の領域では等深線が全体的に沖側に移動

しており、この領域が堆積傾向にあったことを示している。

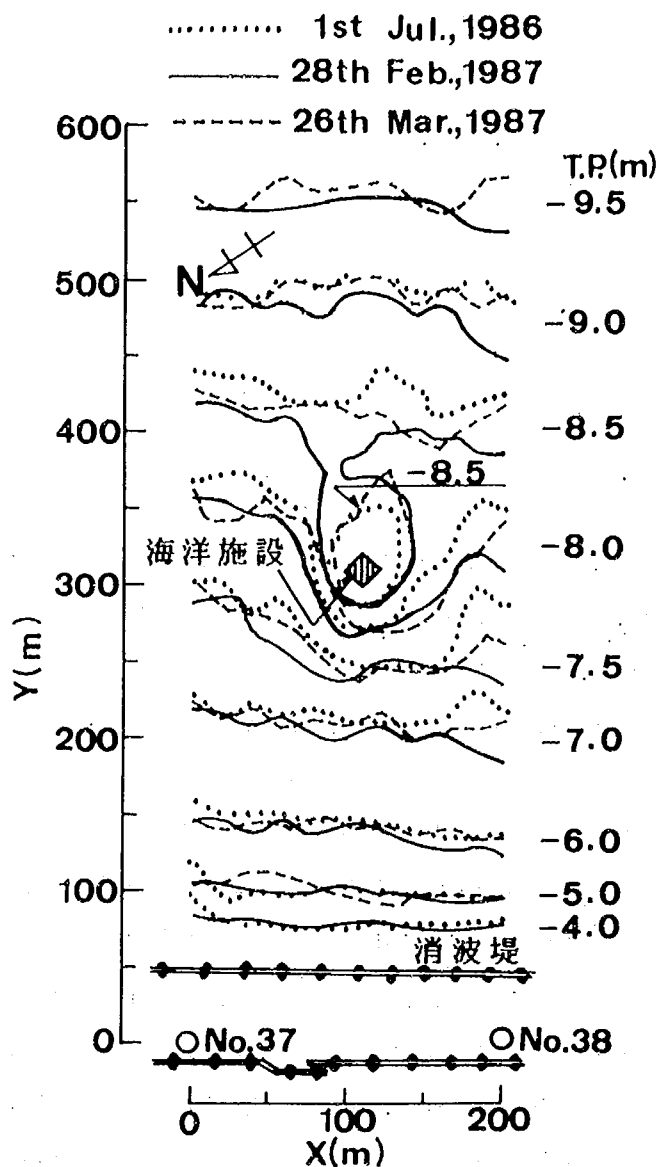


図 15.1 海洋施設周りの深浅図

次に、沿岸方向の海浜断面形の経時変化を図 15.2 に示す。洗掘は、海洋施設が設置されている断面（ $Y = 300$ m）を中心に $Y = 250 \sim 300$ m の範囲で顕著である。この領域の各断面は堆積、侵食を繰り返しており、地盤高の変動は海洋施設の近傍で大きい。また、1987 年 7 月 1 日には全体的に地盤が高い。このことは夏期の施設周りの領域が堆積傾向にあることを示すと考えられる。洗掘形状は、海洋施設を中心に沿岸方向に非対称であり、南西側に偏っている。この非対称性から南西方向の流れが卓越する可

能性が大きいことを前報¹⁾で述べた。1987年2月28日～3月26日の流速データのうち、3月20日5時40分以降のデータは異常値の発生頻度が高かった。このため、3月20日5時40分以降のデータの異常値は除外して解析を行った。異常値の原因は、流速計回収時にロータ、ベーン軸に海藻がからみついていたことから、これら両軸の作動、回転が鈍っていたことが考えられる。20分間の平均流速は 10 cm/s 以下の値が全データの94.6%を占めている(図15.3)。また、頻度が高い流向はSSW～WSWおよびNNEであり、ほぼ施設付近の汀線に沿う方向である(図15.4)。流向の頻度が高いSSW～WSWおよびNNEでは、流速も他の流向に比べて大きく、流向別平均流速は $5.2\sim 7.3\text{ cm/s}$ である(図15.5)。このように、現地の流況は洗掘形状が沿岸方向に非対称であることと対応している。したがって潮流のように沿岸方向に沿う流れが洗掘に対して一つの要因となっていると考えられる。なお、流速計回収時、流速計のロータ部に海藻のからみつきのあったことから判断して、

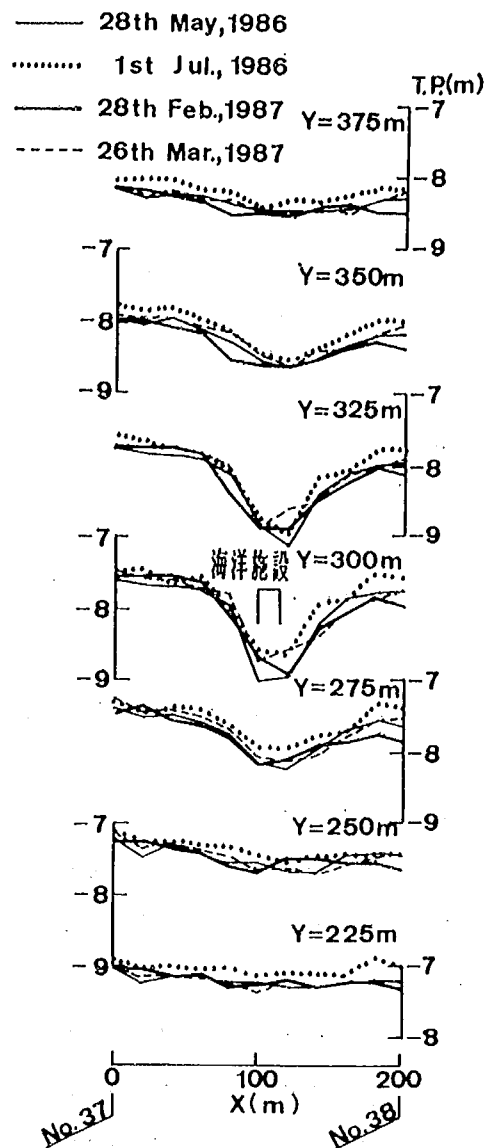


図 15.2 沿岸方向断面形状の比較

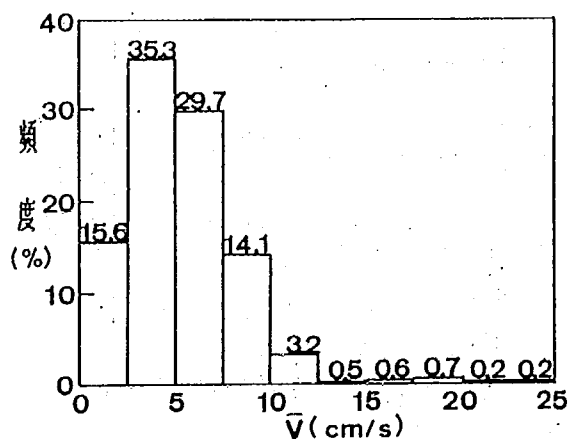


図 15.3 20分間の平均流速の頻度分布

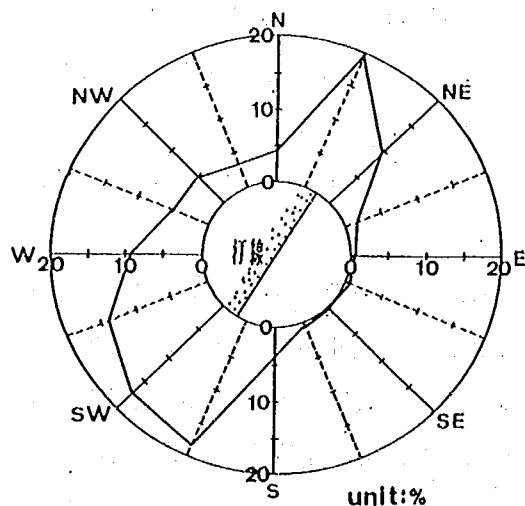


図 15.4 20分間の平均流の流向頻度分布

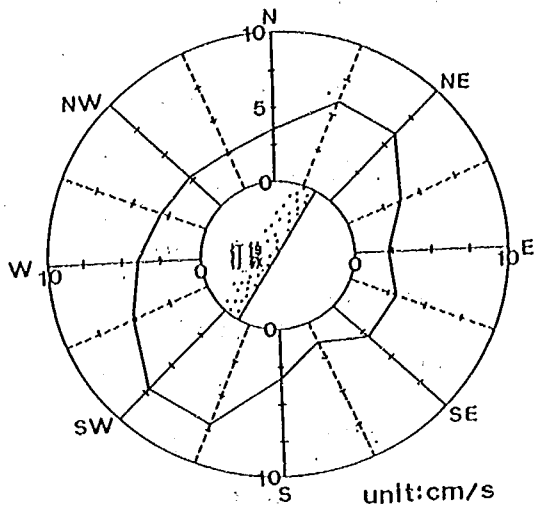


図 15.5 20分間の平均流の流向別平均流速分布

測定終了時刻付近では流速の値は過小に評価されていた可能性があるので、さらに観測法を改良して現在測定中である。

次に、底質の中央粒径 (d_{50}) の岸沖方向の分布を図 15.6 に示す。1987 年 2 月 28 日と 3 月 26 日に採取された底質は $d_{50} = 0.13 \sim 0.27 \text{ mm}$ である。測点ごとに比べると、 d_{50} は 3 月 26 日の方が 2 月 28 日より大きい。この期間、底質を採取した領域ではわずかであるが堆積傾向にあった。一方、1986 年 5 月 28 日～7 月 1 日の期間も底質を採取した領域は堆積傾向にあったが、堆積後の 7 月 1 日の d_{50} の方が 5 月 28 日より小さかった。また、中央粒径の沿岸方向の分布を図 15.7 に示す。岸沖方向と同様に、 d_{50} は 3 月 26 日の方が 2 月 28 日より大きくなっている。特に No.38 側で顕著である。

以上の点より、施設周りの底質の組成分布が著しく変化した可能性があるので、さらに、粒径が 2 mm より大きな底質の含有量の質量百分率を算出し、その岸沖、沿岸方向の分布を調べた (図 15.8, 9)。No.37 + 100 m に沿う岸沖方向の分布 (図 15.8) によれば、礫分を含んだ底質は、

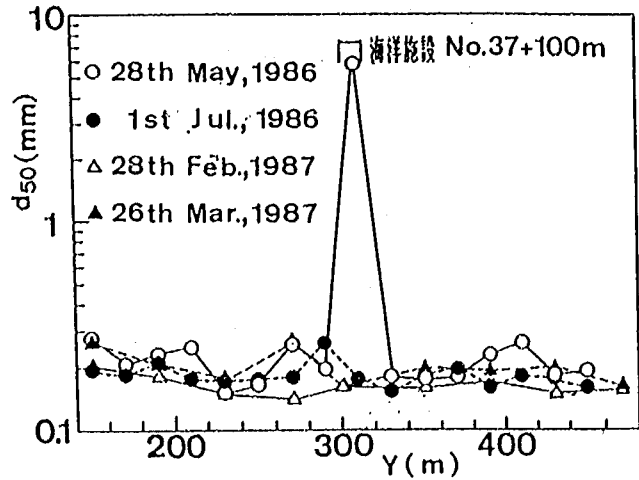


図 15.6 中央粒径の岸沖方向分布

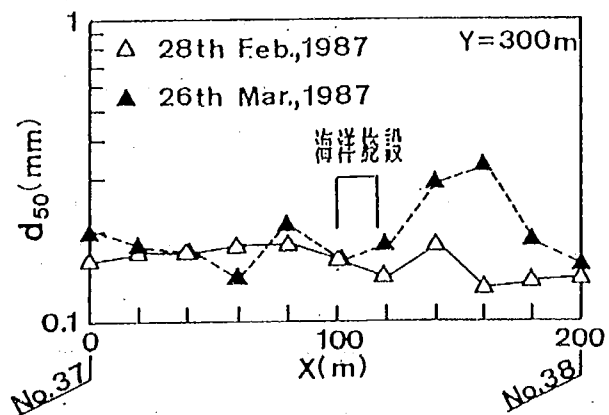


図 15.7 中央粒径の沿岸方向分布図

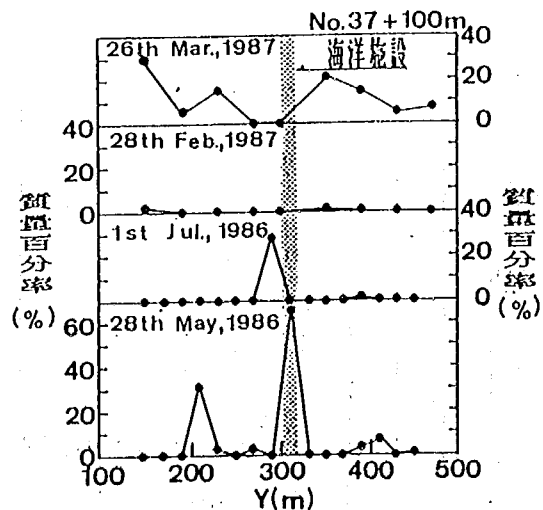


図 15.8 粒径 2 mm 以上の底質の含有率の岸沖方向分布

1987年2月28日まで測線上に点在していたが3月26日には海洋施設付近を除く領域に広く分布するようになった。1986年5月26日～7月1日と1987年2月28日～3月26日の期間は両者とも堆積傾向にあったが、前者の期間では礫の含有量にほとんど変化がみられないのに対して、後者の期間では礫の含有量が増加している。沿岸方向の分布(図15.9)についても岸沖方向の分布と同様な傾向がみられる。すなわち、1986年5月26日～7月1日では堆積後に底質の粒径

が小さくなったのに対し、1987年2月28日～3月26日では礫を含む底質が堆積して粒径が大きくなったことがわかる。このように礫の増加した原因については、大井川港の浚渫土砂(図15.10)が、海洋施設の周辺で投棄されており、それが沿岸方向に移動したことが考えられる。

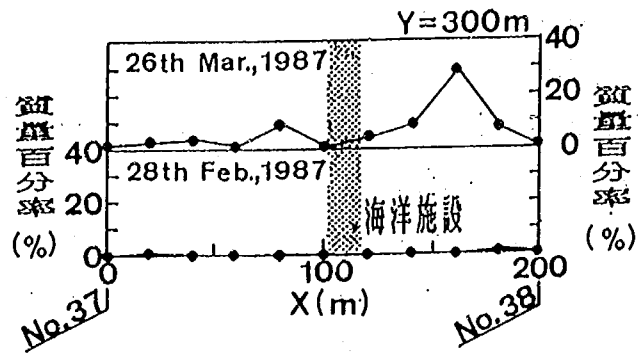


図15.9 粒径2mm以上の底質の含有率の沿岸方向分布

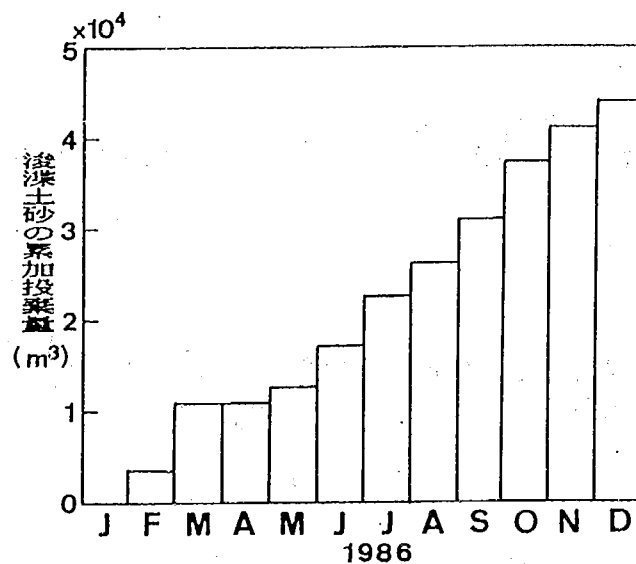


図15.10 大井川港の浚渫土砂の投棄量

次に、光電式砂面計を用いて波浪の変化に対する地盤高の応答性について調査した結果について述べる。有義波高($H_{1/3}$)、有義波周期($T_{1/3}$)、地盤高の経時変化を図15.11に示す。2台の砂面計の変化傾向は良く一致している。有義波高が $H_{1/3} = 1$ mを越えるような波浪状態は1～2日間継続することが多い。地盤変動は波浪状態により以下の3種類に分かれている。

- ① $H_{1/3}$ が1 m未満の場合には地盤高の変動は小さい。
- ② 高波浪中の最大有義波高($H_{1/3})_{max}$ が1～2 mの場合には、波高の増大に急速に应答して地盤高は低下する。しかし、波高が減少し $H_{1/3} = 1$ m未満程度になると地盤高は上昇し、波浪作用

前の地盤高に戻る。

③高波浪中の $(H_{1/3})_{\max}$ が2mを越えるような場合(1987年3月20日), 波高の増大時に急速に地盤高が低下するのは②と同様であるが, 波高の減少時, 地盤高は大きく変動しつつ上昇し, 波浪作用前の地盤高よりも高くなった。

砂面計による地盤高測定による測定開始時(2月27日)と終了時(3月26日)の地盤高は, 終了時の方が各砂面計位置で25および30cm高くなっており, 測定期間を通しては堆積傾向にあったことを示している。スタッフ測量による海洋施設直下の地盤高は, 2月27日ではT・P-9.21m, 3月26日ではT・P-9.03mと8cm高くなった。また, 深浅測量の結果でもこの期間の海洋施設周りの領域は堆積傾向にあった。このように3通り行った地盤高の測定結果はよく一致している。

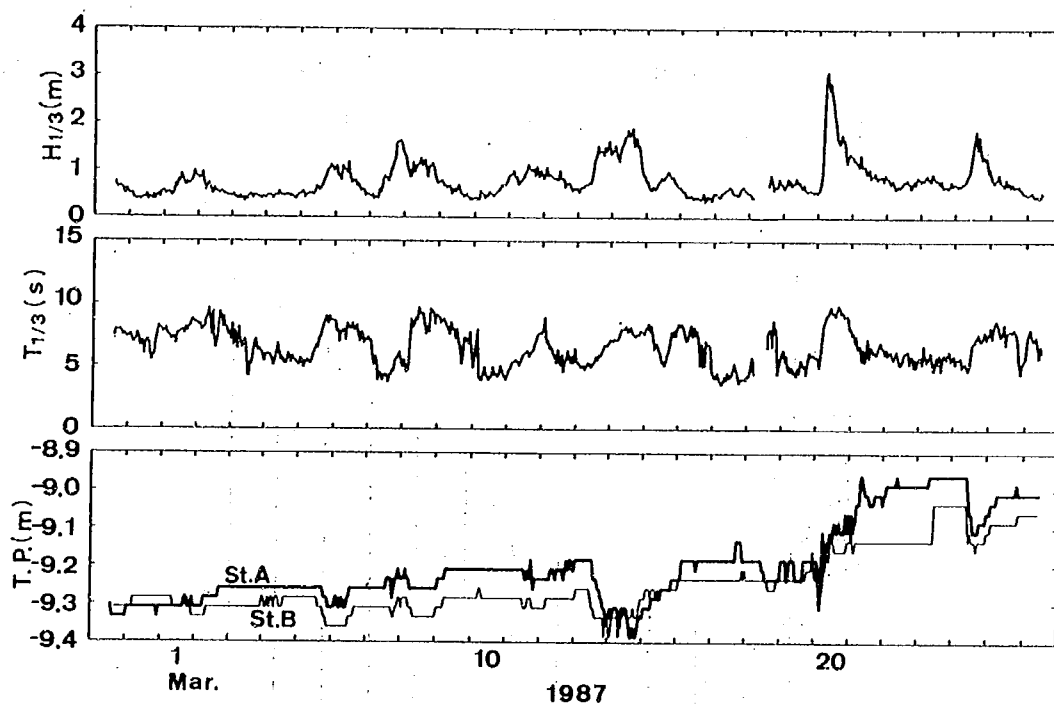


図 15.11 $H_{1/3}$, $T_{1/3}$, 地盤高の経時変化

最後に, 海底における砂の移動形態を表す佐藤・田中による移動限界水深の式と現地の地盤高の変化を比較した。現地の条件は次のように考えた。底質の粒径 d は粒度分布からみて平均的な値を表わすと考えられる d_{50} を用い0.2mmとした。また, 水深 h は砂面計により得られた地盤高からT・P.±0.0mまでの鉛直距離とし, 潮位による補正は行っていない。波高, 波長については有義波の諸元を用いた。現地データは, 地盤高の変化の有無により区別した。すなわち, すぐ前の時刻の地盤高に対して地盤高が変化した場合のデータを地盤高の変化が有るデータとした。St.1で測定されたデータと佐藤・田中の式を図15.12, 13に示す。St.2についてもSt.1と同様の結果であった。地盤高に変化が生じた場合が図15.12である。現地データは地盤高の変化パターンにより以下の4種類に分類される。なお, 凡

例の地盤高変化パターンの模式図中、□印が地盤高の変化したデータである。

- ① ●印に表される地盤高の変化は、地盤面が砂面計センサのごく近傍にあたるため生ずるものと考えられる。したがって、このパターンの地盤高の変化は、他のパターンの地盤高の変化に比べて有意なものではないと考えられる。表層移動、静止領域に多く分布している。
- ② △印で表される地盤高の変化は、波高来襲後および静穏期に地盤高が上昇する場合表れることが多い。この場合、34例中20例が静止領域、14例が表層移動領域にある。
- ③ ▽印で表される地盤高の変化は、波高の増大時に多く見られる。静止領域に分布するデータは22例中5例となり、△印の場合より表層移動領域に分布するデータの割合が多くなる。
- ④ ○印で表される地盤高の変化は、高波浪期間の最大有義波高が2 mを越えるような時に見られる。完全移動領域に分布するデータが22例中10例となり、静止領域では1例が見られるのみとなる。

次に、地盤高の変化が無い場合を示したのが図 15. 13 である。ここでは測定時刻が奇数時の場合を示す。これによれば、246 例中 168 例（全測定データの場合、513 例中 339 例）のデータが静止領域に分布している。表層移動領域に分布するデータも表層移動限界に近い領域に多い。なお、佐藤・田中の式は構造物が無い状態での砂の移動形態の指標であり、海洋施設周りでは構造物による乱れのため砂はより移動しやすい状態にあると考えられる。しかしながら、佐藤・田中の式による砂の移動形態の分類は波高増大時の地盤高低下、高波浪時の大きな地盤高の変化、地盤高が変化しない場合とよく対応しているといえる。地盤高が上昇する地形変化の場合、静止領域に分布するデータが多くなるのは、浮遊砂の

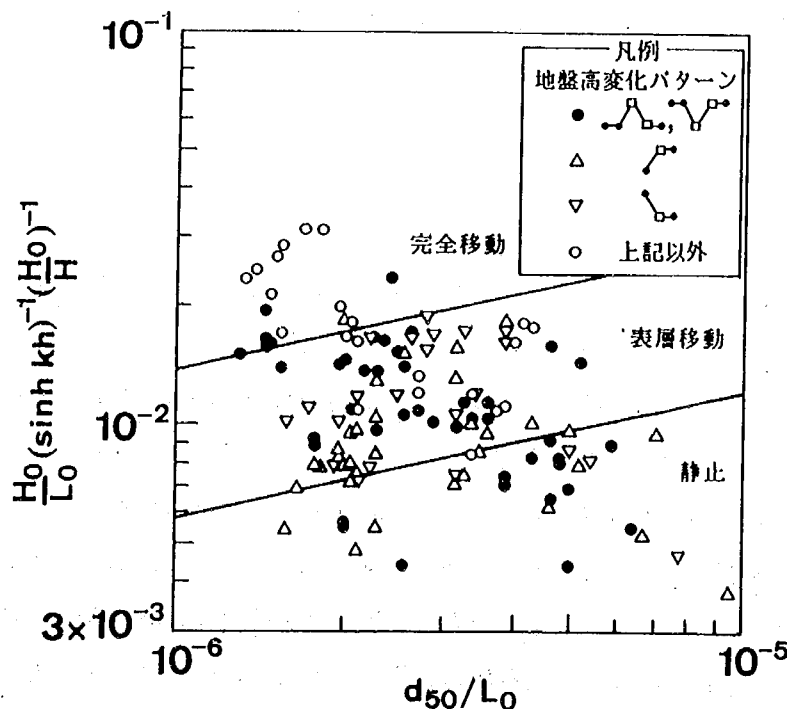


図 15. 12 佐藤・田中の式による底質移動状態の分類
(地盤高の変化あり)

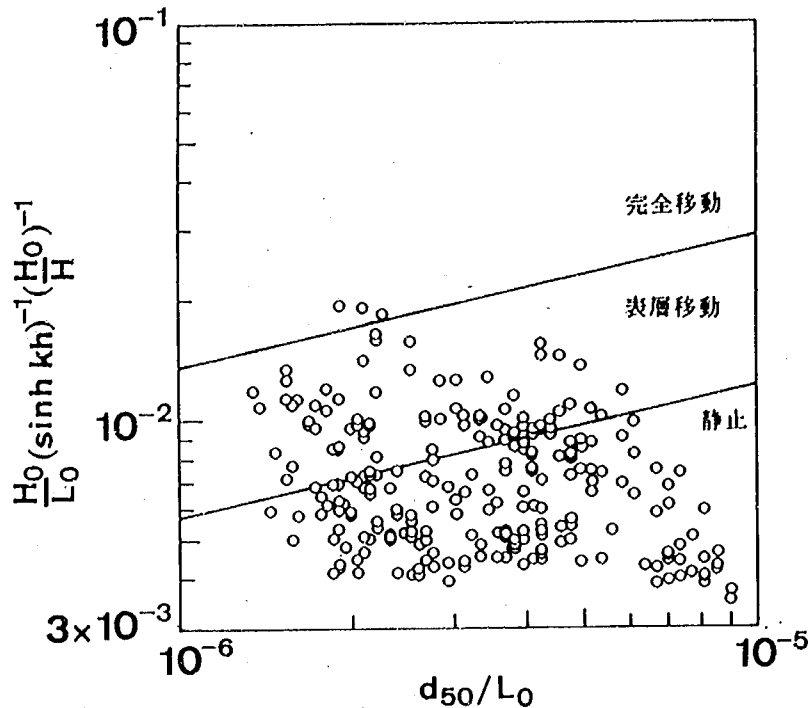


図 15.13 佐藤・田中の式による底質移動状態の分類
(地盤高の変化無し)

沈降が地盤高の上昇に重要な役割を果たしているためと考えられる。

15. 4 考 察

海洋施設周りの地盤高の変化については、次の現象が生じていると考える。海洋施設が設置された後、海洋施設周りは構造物による乱れのため底質が移動しやすい状態になった。このため海洋施設周りでは潮流等の沿岸方向に沿う流れによって移動する底質の量が増加し地盤が低下した。このようにして生じた洗掘は、来襲する波浪の大きさ、期間により、その規模（範囲、深さ）が決定される。このため、洗掘の規模は来襲する波浪により変動する。なお、海洋施設近傍ほど地盤変動が大きくなることもによる乱れのため底質が移動しやすい状態にあるからと考えられる。また、海洋施設直下の地盤高の変化が高波浪期間の最大有義波高 $(H_{1/3})_{\max}$ の大きさにより 2 種類にわかれるのは以下のように推定される。 $(H_{1/3})_{\max}$ が 2 m を越えるような場合は海洋施設を含む広範な領域で底質が激しく移動する。このため、構造物による乱れの影響が及ばない領域の底質の移動が海洋施設周りの領域の地盤高に影響し、海洋施設直下の地盤高は波浪作用前後で変化する。 $(H_{1/3})_{\max}$ が 1 ～ 2 m 程度の場合、海洋施設周り（洗掘が生じている領域）で底質は激しく移動するが、構造物による乱れの影響が及ばない

領域ではわずかに移動するにとどまる。このため、波浪が作用している間海洋施設周りでは地盤高の変動が大きくなる。しかし、底質の移動は海洋施設周りに限られる。したがって、海洋施設直下の地盤高は、波浪作用前後で変化しない。

15. 5 まとめ

- ①洗掘は海洋施設を中心とした半径50mの領域で顕著であり、侵食・堆積を繰り返している。
- ②洗掘形状は海洋施設を中心に南西側に偏っていた。また、20分間の平均流の流向の頻度と流速の絶対値はWSW～SSWおよびNNEで大きくなっていた。後者の事実より直接前者を説明することはできないが、潮流等の沿岸方向に沿う流れが洗掘の発生に重要な一因子となっている可能性がある。
- ③底質の粒径は $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$ 程度がほとんどを占めるが、1987年2月28日～3月26日の期間では岸沖、沿岸方向の両側線上で礫の含有量が増加した。これは、大井川港の浚渫土砂の投棄の影響と考えられる。
- ④砂面計による地盤高測定によると、海洋施設直下の地盤高の変化は波浪条件により3種類に分けられる。すなわち、ⅰ) 高波浪期間の最大有義波高 $(H_{1/3})_{\max}$ が1m未満の場合には地盤高の変動は小さい。ⅱ) $(H_{1/3})_{\max}$ が1～2mになると地盤高の変動は大きくなるが波浪作用前後で地盤高は変化しない。ⅲ) $(H_{1/3})_{\max}$ が2mを越えるようになると地盤高の変動は著しく大きくなり、波浪作用前後で地盤高が変化する。
- ⑤佐藤・田中による移動限界水深による砂の移動形態の分類は、砂面計による地盤高の変動状況を良く説明する。

参考文献

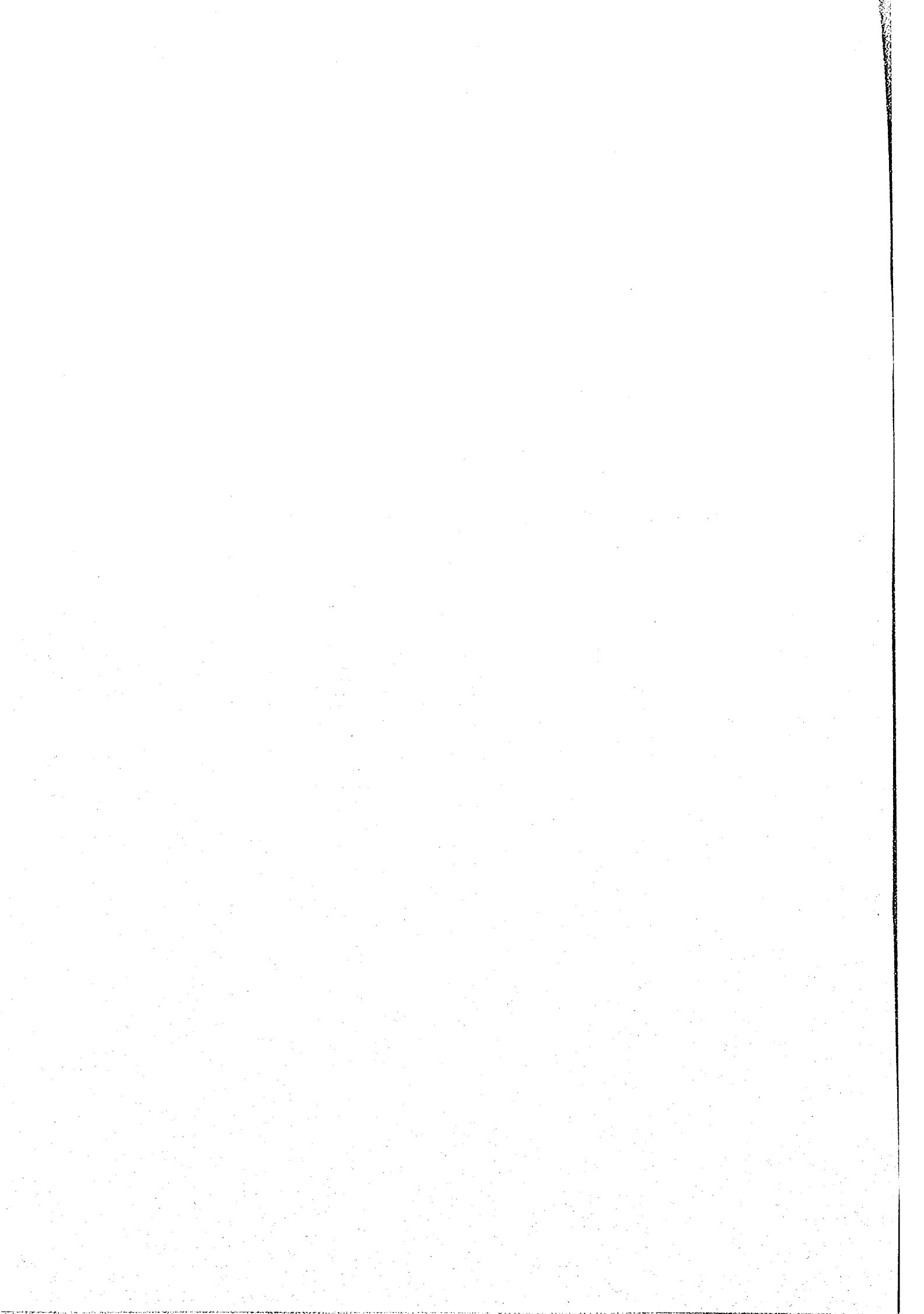
- 1) 宇多高明・堤 博志・村井禎美・藤原隆一：駿河湾海洋施設周りの洗掘実態，第42回年講講演概要集，pp. 622～623，1987.

第16章 湘南海岸の地理的、海岸工学的 諸条件に関する検討

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

部外研究員 武中 信之



16.1 まえがき

最近、沿岸域の空間を多目的に、かつ高度に利用する方策として建設省ではMMZ構想を進めている。土木研究所ではこの構想に基づき、外洋に面した海岸において波、流れ、漂砂を制御する海域制御構造物の開発研究を進め、現在までにいくつかの構造物の具体的なイメージが固まってきた^{1),2),3)}。このようにいわばハードな面での研究はかなり進んできたが、構造物の開発においては、単に構造物の機能性、安定性、施工性などの検討を行うのみでは不十分である。実際には、開発や保全などの計画が予定される海岸の具体的条件のもとで、構造物を造るとすれば何が問題であり、さらに構造物の設置によってどこまでが解決されるかの検討が必要である。そこで、本研究では具体例として湘南海岸を選び、地理的、海岸工学的諸条件について整理し⁴⁾ 計画立案上の留意点を検討することにした。

湘南海岸は明治期より海浜リゾート地として発展してきた⁵⁾。海岸の東部には観光資源の豊富な鎌倉があり、また最近では海洋レクの拠点として多くの人が訪れている。しかし一方では、沿岸域の都市化による環境破壊、海岸侵食による砂浜の減少など湘南海岸の貴重な財産を脅かす深刻な問題が生じている。このような特性、問題を持つこの海岸を例として種々の検討を行うことは、多くの海岸の今後の方向性を検討する上で役に立つと考えられる。

16.2 湘南海岸の土地利用

最初に、湘南海岸の土地利用の変化について調べた。土地利用の実態を知るとは、地域特性と自然環境の変化を知る上で有効である。海岸線から1 kmの範囲における市街地の変遷を図16.1に示す。黒い部分が市街地を表わしており、海岸域で都市化が急速に進んだ様子が良くわかる。特に、江ノ島より東側の区域と小田原近郊での都市化が激しい。

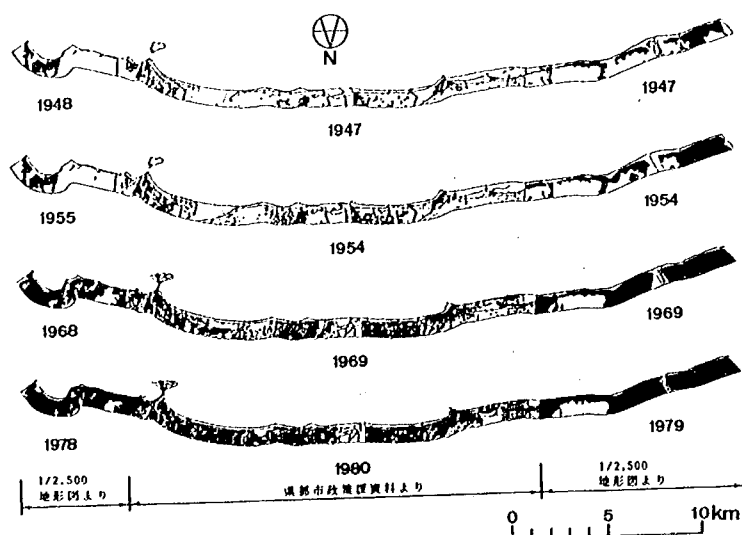


図 16.1 海岸域における市街地の変遷（1947年～1980年）

図 16.2 は、図 16.1 と同じ範囲における樹林地の変遷を表わす。黒い部分が樹林地で、市街地とは逆に減少傾向にある。特に江ノ島より東側の区域で樹林地の減少が著しい。図 16.1 と比較すると、市街地の増加と樹林地の減少が対応している様子が良くわかる。1980 年頃の樹林地の分布をみると、海岸域の樹林地はほとんど消失してしまっている。

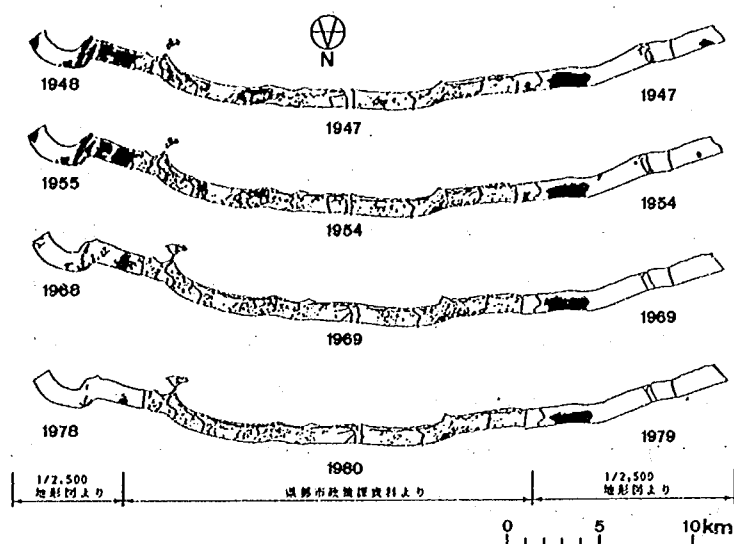
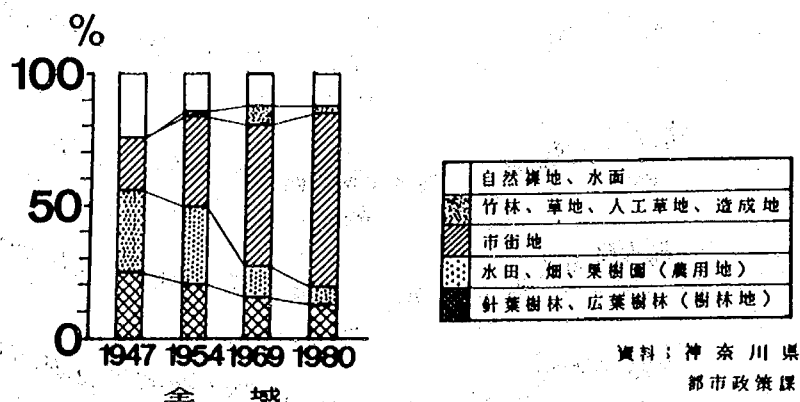


図 16.2 海岸域における樹林地の変遷（1947 年～1980 年）

次に、地域別の分布ではなく、海岸全域での土地利用率の変遷を図 16.3 にまとめた。1947 年には約 20% であった市街地率は徐々に増加し、1980 年には約 60% に達している。逆に、農用地および樹林地は 1947 年には 55% を占めていたが、急激に減少し、1980 年には 20% 弱になった。急速に進んだ都市化が農用地および樹林地を市街地に変えていったのである。特に農用地の減少は著しい。



資料：神奈川県
都市政策課

図 16.3 湘南海岸全域における土地利用の変遷（海岸線から 1 km の範囲）

湘南海岸を9地区に区分し、各地区ごとの市街地率と樹林地率の1947年より1980年までの変化を図16.4にまとめて示した。市街地率は全地区とも大きな伸びを示しており、小田原、酒匂・国府津、鎌倉では市街地率が90%程度まで達している。ただし、小田原および鎌倉地区は古くから栄えた町である。したがって、市街地率の変化が急速であったのは、むしろ酒匂・国府津および平塚～七里ヶ浜の地区と言うべきであろう。これらの地区では当初10～20%であった市街地率が70～95%と高い伸びを示している。他地域に比べ市街地率が低いものは二宮、大磯の2地区であった。この2地区では伸びも比較的小さい。

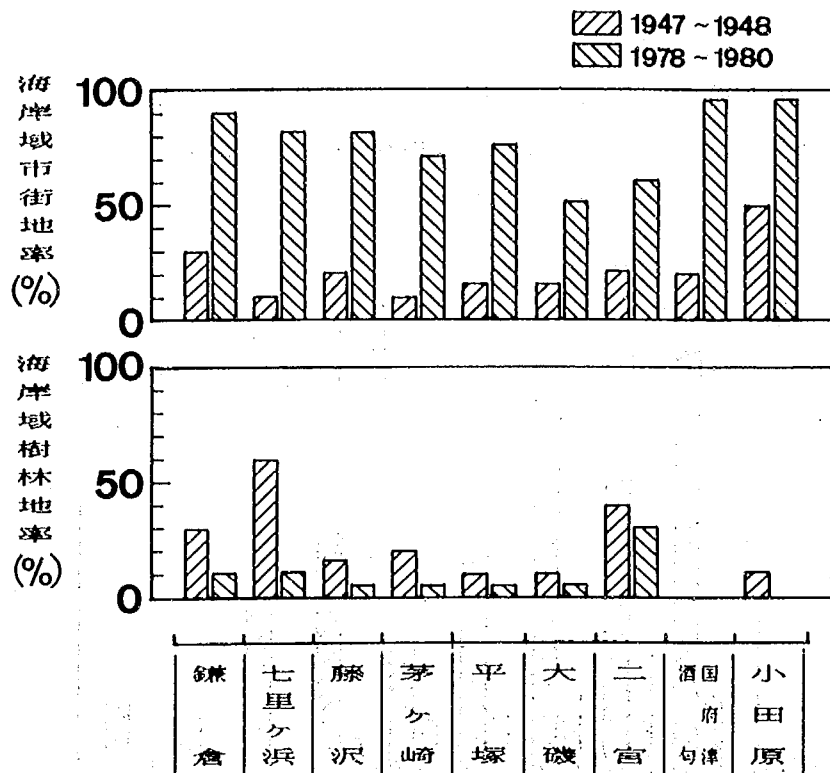


図 16.4 各地域ごとの市街地率、樹林地率の変化（1947年と1980年の比較）

樹林地率は全地区とも減少している。著しい減少を示したのは七里ヶ浜地区である。1984年に60%あった樹林地率は30年間で10%程度まで減少している。逆に減少が少なかったのは二宮地区である。1947年に約40%であった樹林地は、1979年になっても約30%も保存されている。どの地区においても市街地率と樹林地率には相関がみられ、都市化により樹林地が市街地へと変わったことがわかる。現在の海岸域の樹林地率はほとんどの地域で10%以下となった。以上のように、沿岸域での都市化の進行に伴って樹林地が消失したが、残された緑地の価値が高いことを考えると、今後の沿岸域の開発では単に砂浜域を広げるのみではなく、併せて広い緑地をも創出する必要がある。

16.3 湘南海岸の海岸工学的特性

湘南海岸の海岸工学的見地からみた特性について述べる。水深20mおよび200mまでの等深線距離を各地区ごとに整理すると、図16.5となる。水深20mまでの距離は小田原より鎌倉へ接近するほど長くなる。等深線距離の逆数は海底勾配に比例するから、浅海域での海底勾配が緩くなっていることがわかる。また、平塚を除けば水深200mについても同じ傾向を示している。海洋構造物の設計に際し、構造物に作用する波力は急深な海岸ほど大きい。従って図16.5によれば、鎌倉から平塚間（湘南地域）と大磯～小田原間（西湘地域）とでは設計条件が大きく異なり、西湘地域の方が厳しい設計条件となって、同一の条件では論じ得ないことになる。構造物について考える場合、この点によく留意する必要がある。

波の遮蔽物については湘南地域に多く、西湘地域には見当たらない。また、漂砂の供給源となる河川は図に示す地域に分布しているが、二宮～大磯、七里ヶ浜～鎌倉など河川から遠い地区もある。

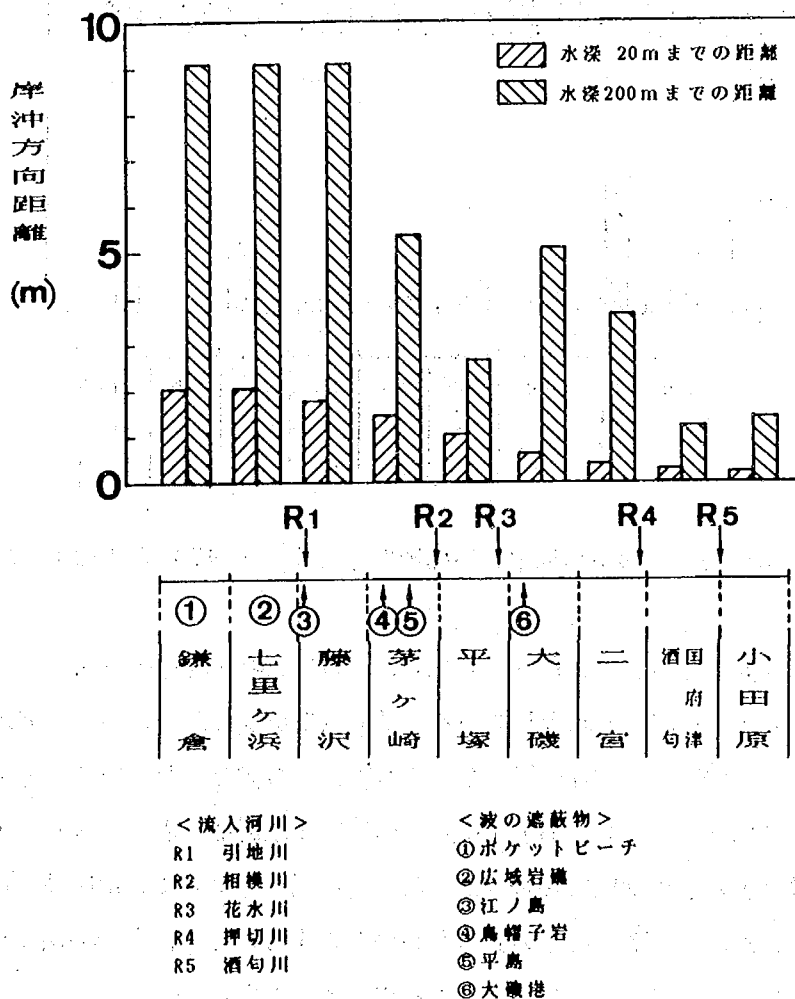


図16.5 水深20mおよび200mまでの等深線距離の沿岸分布

次に、侵食の実態を知るため、地形図をもとに汀線変化について調べた。原則として改測時の地形図を用い、1954年、1966年、1983年の3時点で比較した。図16.6は1954年の汀線を基準とした1966年と1983年の変化量である。図より次の2点がわかる。

- ① 汀線の前進しているのは姥島から江ノ島の区間と押切川河口部および森戸川河口部である。
- ② 他の区間は、29年間に平均50m程度後退しており、特に相模川河口東部や酒匂川河口の東側隣接区域では100m以上汀線が後退した。

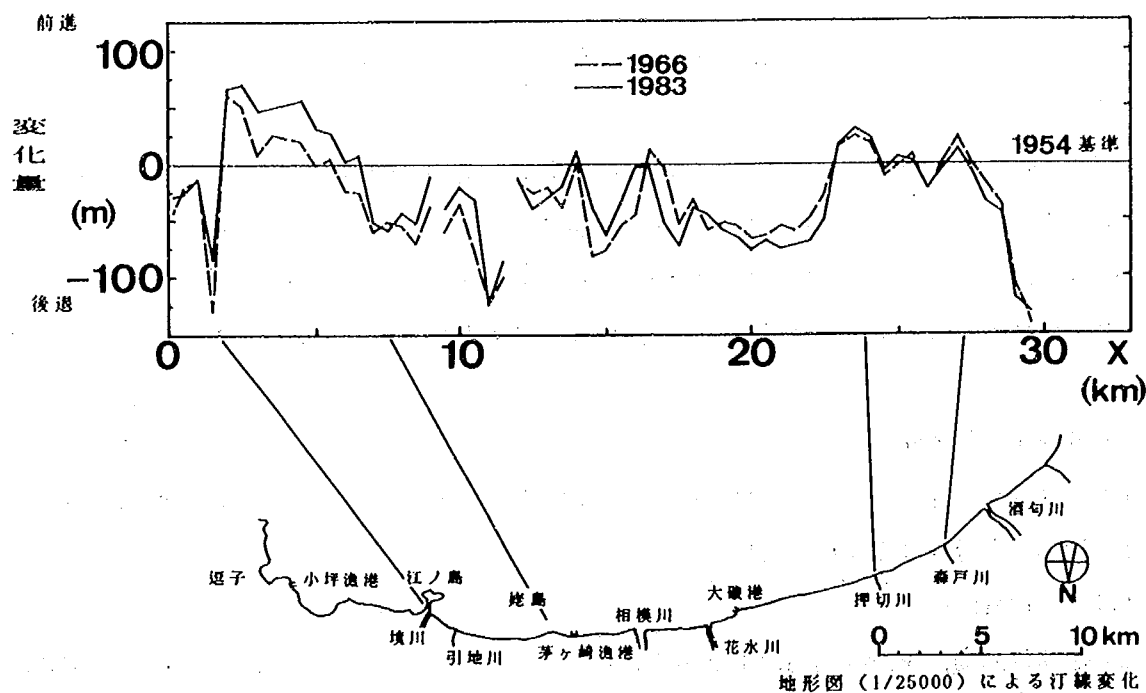


図 16.6 地形図より求めた汀線変化 (1954 年～1983 年)

全体的に見ると汀線の後退域の方が前進域よりはるかに広がっている。この原因の一つは、西湘海岸で見られるように、海岸が急勾配のため海底谷を通して沖へ土砂が流出することがあげられる⁶⁾。

1979年の航空写真より求めた各地域の平均砂浜幅を図16.7に示す。砂浜が比較的広いのは大磯～藤沢間で、特に平塚では平均50m以上の砂浜幅となっている。逆に酒匂・国府津～二宮および七里ヶ浜～鎌倉の地区では平均20～30mと非常に狭くなっている。長期的に見ると汀線は図16.6に示したように後退傾向にあり、またその砂浜幅も上述のようにかなり狭いものとなっている。したがって今後は、養浜等を行うことによって砂浜幅を広げる必要がある。また、砂浜はそれ自体が良い消波効果を持っているので、波浪災害の軽減化に役立つであろう。ただし、当沿岸の海浜勾配は大磯より西で急であるから同じ養浜を行うにしても西湘域での養浜砂の安定性の検討は技術的にかなり難しくなることに留意すべきである。

海岸侵食状況の次には、海岸保全施設の現況について調べた。現況の海岸保全施設の天端高および背

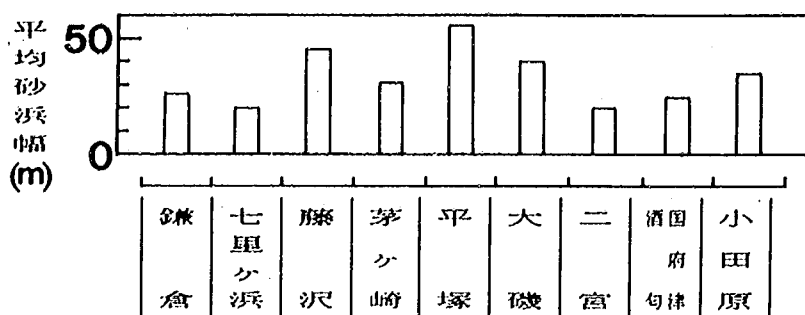


図 16.7 各地域ごとの平均砂浜幅

後道路（国道 134 号線、西湘バイパス）までの最高地盤高の分布を図 16.8 に示す。また、神奈川県における高潮、津波を対象とした堤防天端高の計画値を図中に示す。神奈川県の実施計画では、小坪漁港～江ノ島間は T.P. + 4.0 m、江ノ島～酒匂川間は T.P. + 6.5 m である。この計画値と現況との比較により、津波および高潮に対する保全施設の現況を評価することができる。評価は概ね次の 3 区間で分かれる。

① 小坪漁港～江ノ島区間

現況天端高は高潮計画値については一部を除き満足していない。ただし、背後の最高地盤高は江ノ島寄りの地区で十分な高さを持っている。

② 江ノ島～大磯港区間

現況天端高は高潮、津波計画高以下である。しかしながら、背後の最高地盤高は津波計画高に対し江ノ島～茅ヶ崎漁港地区間で同等、茅ヶ崎漁港～大磯港区間でそれ以上の高さとなっている。

③ 大磯港～酒匂川区間

現況の天端高は高潮、津波計画高を満足している。

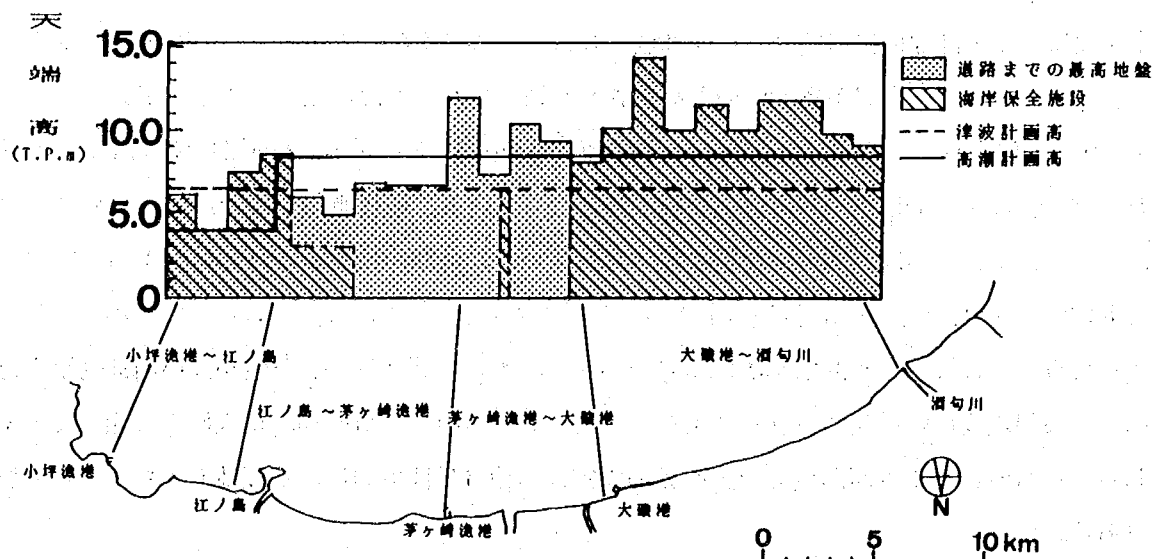


図 16.8 道路までの最高地盤高の沿岸分布

海岸保全施設の整備状況は、堤防天端高の計画高に達しない部分の面積（切欠面積）の地域別分布より知ることができる（図 16.9）。切欠面積は大磯以東の湘南地域で大きく、特に茅ヶ崎、藤沢地域がきわだっている。西湘地域では切欠面積は少なく、津波、高潮に対する対策は十分整っているといえる。図 16.9 には後背地の低地分布も示した。低地が多いのは平塚、茅ヶ崎、藤沢の3地区である。また、地盤高 $H \leq 4.5$ m の地域があるのは上記3地区のほか大磯を含めた4地区である。これらの地域は上述したように津波、高潮発生時に影響を最も受けられる地区である。よって今後はその対策について配慮する必要があるだろう。さらに、図には保安林幅も図示した。保安林は大磯、平塚、茅ヶ崎、藤沢の4地区にあるのみである。この4地区では、保安林は平均約50mの幅の緑地を形成している。

津波や高潮に対する保全施設や後背地等の状況を見ると、西湘地域は良い条件を持っている。逆に湘南地域は低地も多く、保全施設も十分とは言えない。しかしながら、湘南地域のうち藤沢～大磯地区では西湘地域にはない広い砂浜、防砂林等の自然の緩衝帯がほぼ全域に広がっている。その意味では、早急な対策が望まれるのはむしろ鎌倉～七里ヶ浜の地区であろう。

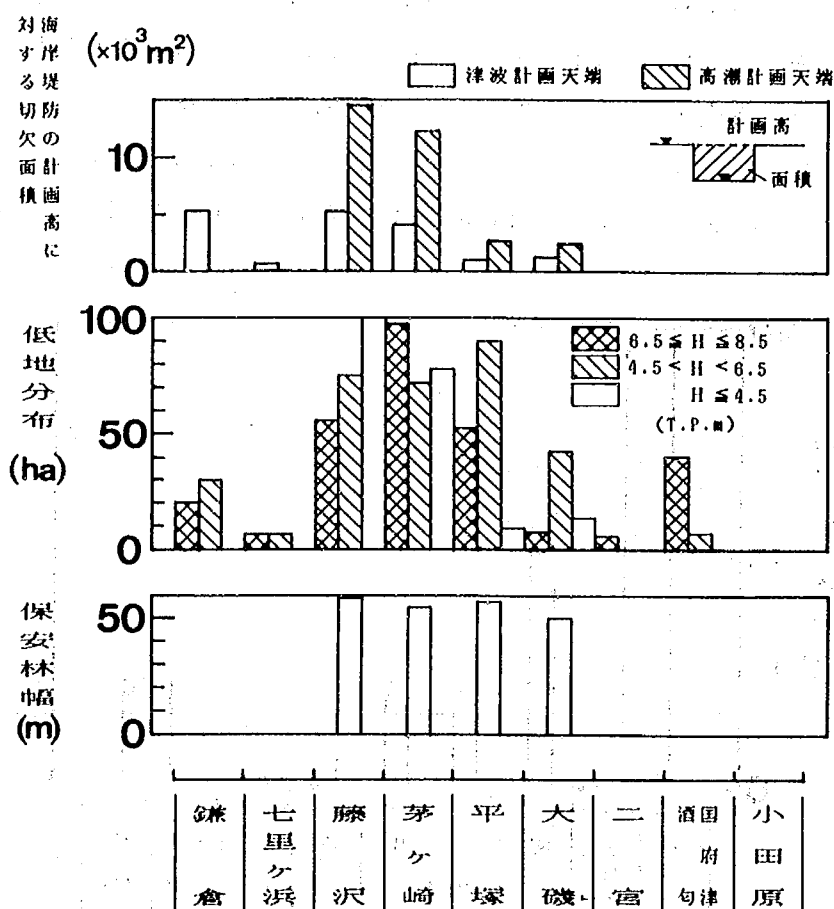
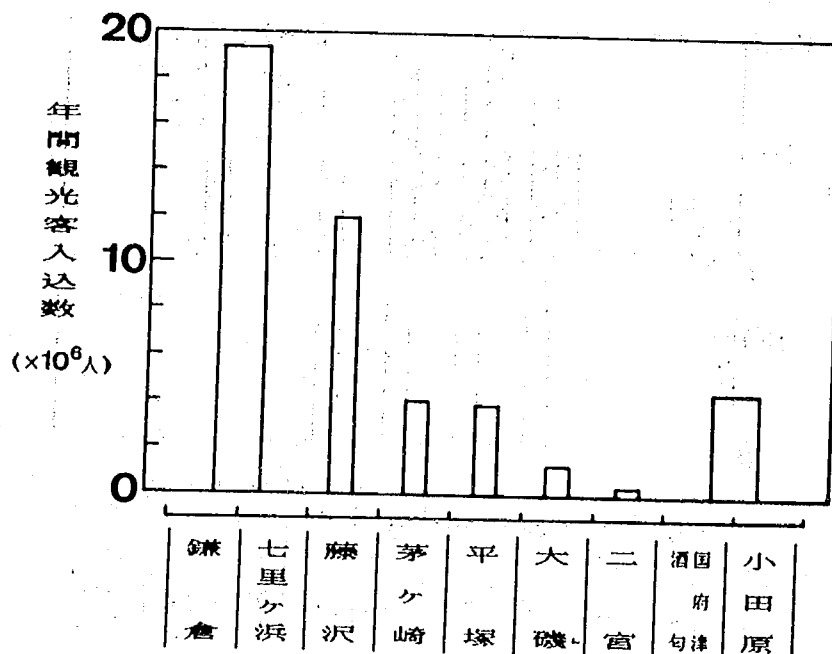


図 16.9 後背地の低地と保安林の地域別分布

16.4 海洋性レクから見た湘南海岸の特性

湘南海岸は首都圏の近くにあるので、日帰り客を中心に観光客数は近年増加傾向にある。1984年の年間観光客入込数を地区別にまとめると図16.10となる。最も入込数が多いのは鎌倉・七里ヶ浜の地区で、年間2,000万人近くが訪れている。これは鎌倉に観光資源が多いことに起因している¹⁾。次に多いのは藤沢地区の約1,200万人である。藤沢地区は江ノ島を中心として海水浴場も多く、レクリエーションの基地的な要素を持っているためと考えられる¹⁾。西湘地域では、どの地域の場合も入込数は、500万人以下であって、鎌倉や藤沢地区と比較してずっと少ない。これは鎌倉、藤沢を含む湘南地域に比べ西湘地域が観光地としての魅力に欠けることを示している。西湘地域での観光客入込数を増やすには、魅力ある観光拠点となる場所の開発が必要である。

比較的新しい観光資源である海洋性レクから見た湘南海岸の特性について述べる。なお、従来より海洋レクリエーション(海洋レク)と海洋性レクリエーション(海洋性レク)なる用語が使われているが、その概念には多少の混乱があるようである。そこで、本研究では海洋性レクの内容を次に述べる項目に限定し、その条件のもとで検討を加えることとした。現在、主に湘南で行われている海洋性レクには海水浴、サーフィン、ウインドサーフィン、ヨット、モーターボートなどがある。海水浴は最も一般的な海洋性レクの一つであり、現在でも湘南海岸の主な集客源となっている。また、サーフィン、ウインドサーフィンは、青年層を中心に海洋性レクとして定着しつつあり、湘南海岸でも盛んに行われている。ヨット、モーターボートも小型艇を中心に増加が著しく休日に沿岸部で帆走を楽しむ人が増えている。



出典：県観光振興対策協議会資料

図16.10 年間観光客の入込数の地域別分布(1984年)

これら海洋性レクのポイントと、関連する施設の分布を図 16.11 に示す⁸⁾。海水浴場は平塚を除くほぼ全域に分布しているが、西湘地域に比べ湘南地域に多く存在する。サーフィンのポイントは茅ヶ崎を中心に相模川河口周辺から稲村ヶ崎にかけて広がっている。この区域における水深20mの等深線距離の分布は既に図 16.5 に示したが、図 16.5 において茅ヶ崎～鎌倉の間は等深線距離が西湘海岸と比較してずっと長い。すなわち、沖浜の海底勾配が緩いことがわかる。このような海岸では波の浅水変形が緩やかなためサーフィンの適地となると考えられる。すなわち、サーフィンの適地とするためには緩勾配な海岸を創成することが一つの基本条件となる。ウインドサーフィンは、鎌倉より東側の三浦海岸沿いにポイントが分布している。この理由はいくつか考えられる。まずウインドサーフィンでは技術的に初心者が多いため、比較的波が穏やかな海岸が好まれる。また、転倒の時に岩礁に当たって負傷する危険など

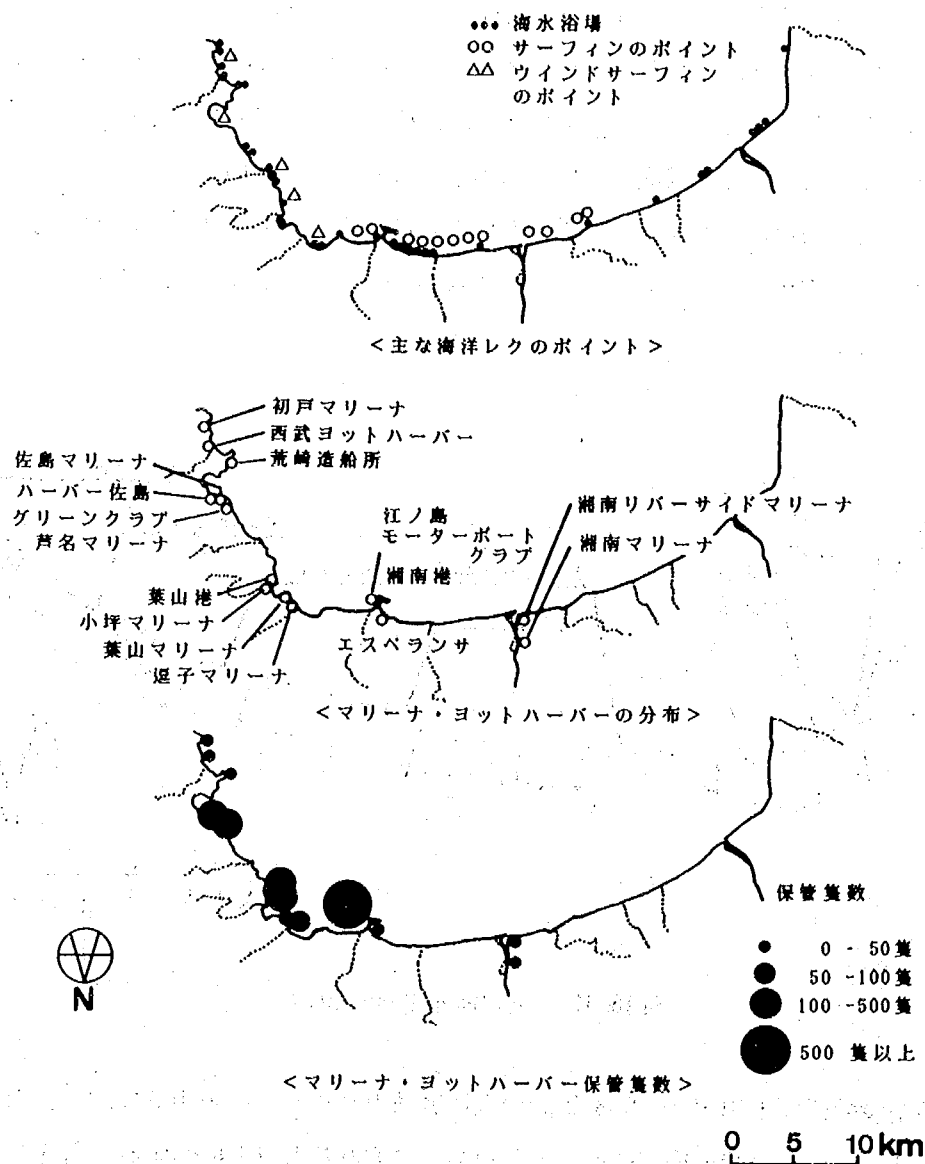


図 16.11 主な海洋性レクのポイントと関連する施設の分布

から砂浜のある湾部を適地とすることが多い。結局、サーフィンの適地とするためには、海底勾配を緩くし、浅水変形が緩やかに生ずるようにする必要がある。また、ウインドサーフィンについてはかなり静穏で、障害物のない広い砂浜海岸が望ましいと考えられる。

次にマリーナ、ヨットハーバーの分布を示す(図 16.11)。湘南地域には江ノ島湘南港をはじめとして多くのマリーナ、ヨットハーバーが点在している。湘南地域には波の穏やかな湾部が多く、マリーナやヨットハーバーとしての特質を備えているためである。諸施設の充実に比例してヨット、モーターボートも集中し、小型艇の保管隻数も他地域に比べ多い。1隻当りの利用海域面積を考えれば保管隻数は飽和状態にあり、別の地域に施設が立地することが望ましい。対照的に、海岸線に変化のない砂浜が続く西湘地域では係留設備が少なく、保管隻数はごく少ない。

ここで挙げた海洋性レクについては、どれも西湘地域より湘南地域にポイントおよび施設が多い。どの海洋性レクでも、活動の拠点となるのは十分な適地条件を備えた場所である。海洋性レクを主眼とする開発を行う場合、限定された自然条件のもとで、現在適地と言われている場所の諸条件を模倣するための方策について考える必要がある。したがって、単に海域制御構造物を設置して静穏化をするという認識では検討が不十分であり、より具体的な面より種々考察しなければならない。

海洋性レクのうち、海水浴場についてさらに細かな状況と問題点について述べる。湘南海岸の主な海水浴場の位置とそれら海水浴場が含まれる海岸の範囲を図 16.12 に示す。平塚海岸を除くすべての海岸が海水浴場を有している。

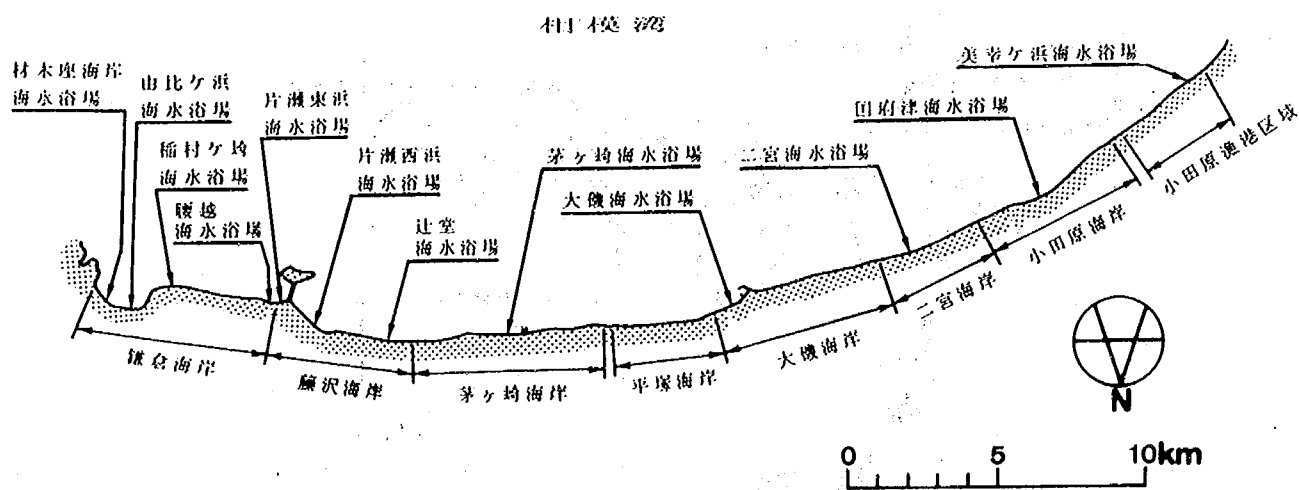


図 16.12 主な海水浴場の位置

各海水浴場の施設の概要と 1978～1983 年間の入込客数の経年変化を表 16.1 に示す。年変動が大きい。全体の入込状況は少ない時で約 600 万人、多い時には 800 万人以上に達する。各海岸別では江ノ島をはさむ片瀬西浜、東浜両海水浴場が最も入込数が多く、全体の 50% を占める。これに対し、西湘地域にある国府津、二宮等の海水浴場は入込数も少なく年々減少傾向にある。前者の海水浴場は施設面でも

表 16.1 各海水浴場入込数

海水浴場名	遊 泳 区 域 (m)			施 設 数			海水浴場利用者数 (千人)							
	間 口	奥 行	沖側水深	更衣休憩所	飲食店	貸ボート	1978 年	1979 年	1980 年	1981 年	1982 年	1983 年	1984 年	平 均
御 幸 ケ 浜	80	50	2.5	5	5	0	275	101	85	143	143	144	155	164
国 府 津	100	50	2.5	0	0	0	99	48	12	31	30	34	40	42
二宮町袖ヶ浦	100	80	2.0	0	0	0	65	36	7	67	16	17	34	35
大 磯	250	80	2.0	15	20	0	476	397	227	416	350	411	684	423
茅 ケ 崎	200	100	2.0	12	19	20	780	1016	863	1423	766	1221	1233	1043
辻 堂	50	30	3.0	1	2	4	36	182	38	19	118	59	54	72
片瀬西浜	1130	150	3.0	24	28	225	1406	1008	869	1335	1127	1772	2383	1414
片瀬西浜	490	120	3.0	22	25	307	2172	1771	1002	2295	1831	1829	2068	1853
腰 越	220	80	1.5	3	0	25	58	48	23	102	22	39	54	49
稲村ヶ崎	110	80	1.5	3	0	20	76	31	24	101	30	72	50	55
由比ヶ浜	890	100	1.5	24	10	140	886	892	654	962	957	1179	1437	995
材木座	660	40	1.5	20	0	150	689	792	369	455	461	453	447	524
合 計	-	-	-	129	109	891	7018	6422	4222	7349	5851	7230	8639	6669

他の海水浴場と比べ非常に充実した内容を有している。逆に後者の海水浴場では施設も貧弱で砂浜幅も狭く、魅力に乏しい海水浴場となっている。湘南地域と西湘地域を比較すると、入込数の多い海水浴場は湘南地域に多く、西湘地域には少ない。海水浴場の集中度は地域によりかなりの格差ができていることがわかる。

各海岸地域にある海水浴場の状況を図 16.13 に整理した。海水浴場の面積は、多くの海水浴場を持つ藤沢と鎌倉が 6～7 ha と広く、他を大きく上回っている。他の地域の海水浴場の広さは、0～2 ha である。年間入込数においても、片瀬西浜、東浜を含む藤沢が平均 300 万人以上を確保し、湘南海岸での海水浴場の中心地となっていることがわかる。次に混雑度を一人当たりの砂浜面積を表わすと、どの海岸の場合も約 1 m²/人と著しく狭い。このような海水浴場の混雑過多は湘南海岸全域での大きな問題とな

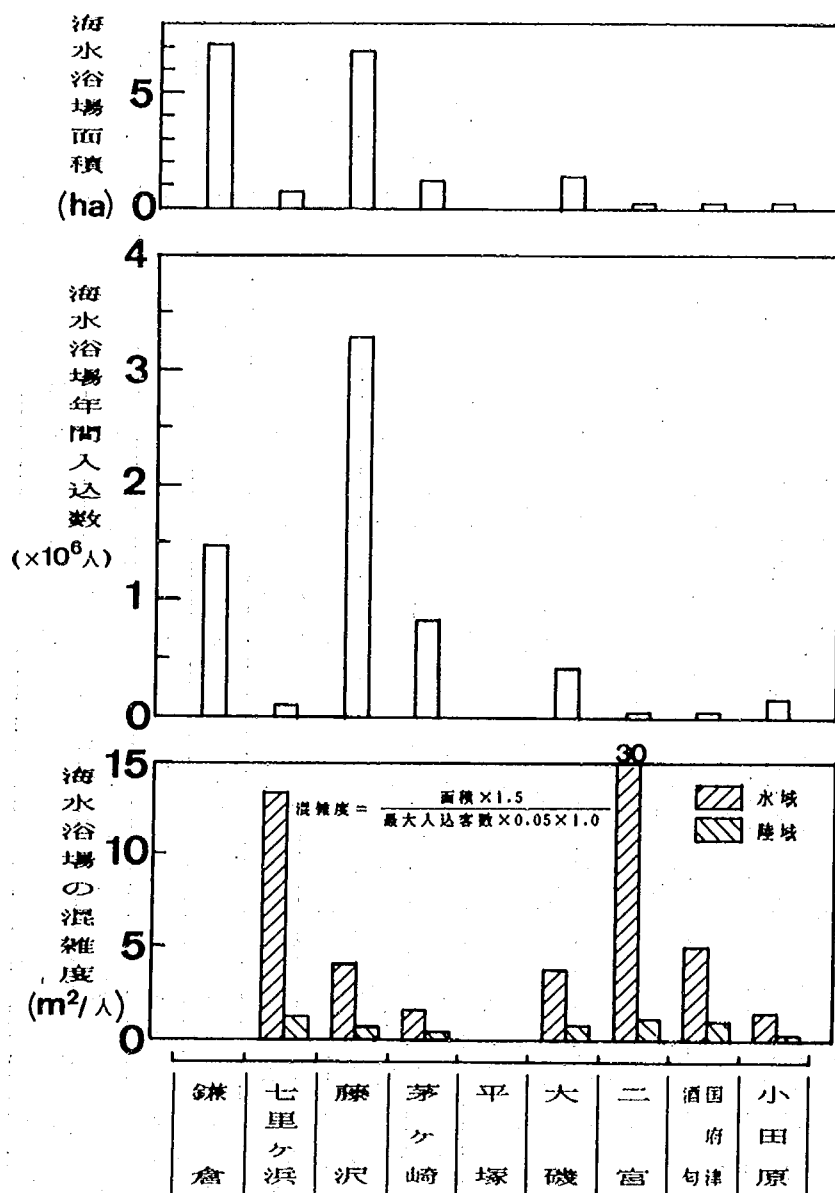


図 16.13 海水浴場面積、入込数、混雑度の地域別分布

っている。したがって、将来的には養浜を行うなどして広い前浜を確保することや、波が荒いため利用できない場合は波の静穏化を図ることなどが必要である。技術的には、実際に養浜を行うことによって砂浜幅を広げられるかどうか、あるいは構造物による波浪の静穏化を図る場合には、具体的に創出される静穏域の広さなどについて検討する必要がある。

海岸利用を考える場合、海岸へのアクセスの問題も重要である。公共交通機関を利用した場合の駅から海岸までの時間距離が問題となる。海岸域への交通手段を図 16.14 に示した。時間距離は全地域とも短く、小田原～大磯間は鉄道の駅より徒歩 4～10 分、藤沢～鎌倉間は駅の前が海岸である。最も離れている平塚～茅ヶ崎間でもバスで 5 分内外の距離である。

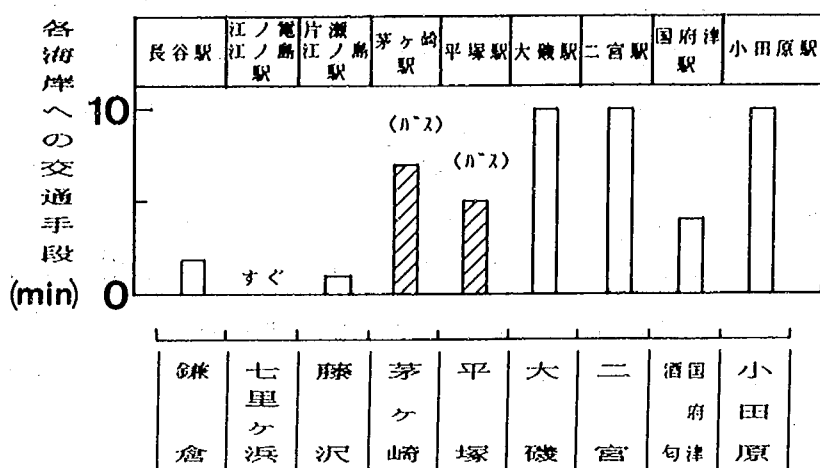
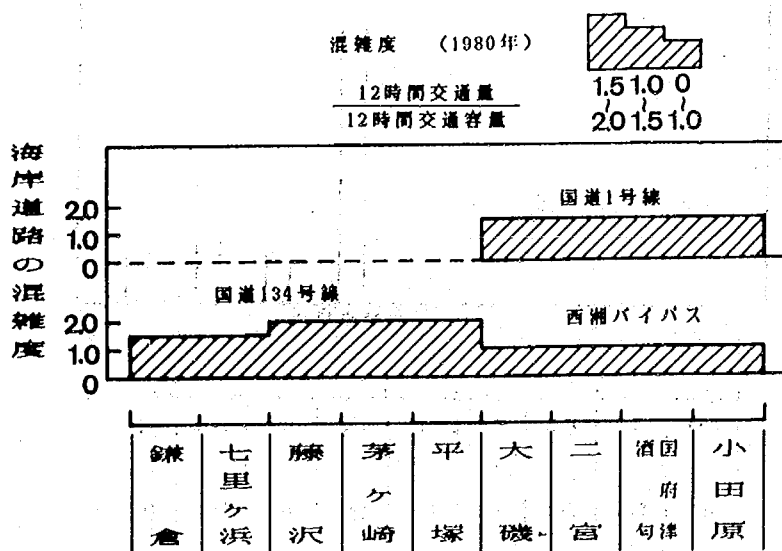


図 16.14 各海岸への交通手段

湘南海岸では全域にわたり海岸道路があり、交通至便である。首都圏から車の利用を考える人も多く、道路の混雑状況は地域住民にとって関心があるだけでなく、海岸の利用者にとっても重要である。そこで海岸道路の混雑度を図 16.15 に示した。西湘地域では国道 1 号線と西湘バイパスが平行して走ってお



出典：『かながわの県土(1984年)』

図 16.15 海岸道路の混雑度

り、国道1号線の小田原地区を除けば混雑度は1.5以下に抑えられている。これに対し、国道134号線の平塚～藤沢間では混雑度が1.5を越え、かなりの渋滞域となっている。西湘バイパス以外の海岸道路の混雑度は慢性化しつつあるので、その緩和を図ることが必要と考えられる。しかしながら海岸付近にバイパスを造ると、陸域と海域を遮断することになり、海浜へのアクセス確保の面では新たな問題を生ずることもあり得る。

海岸に求められるのは、国土保全と観光だけではない。親しみやすい海岸であることも大切な要素である。湘南海岸の各地域における親しみ易さを考える。鎌倉～大磯港間は海岸道路から海岸に自由に入りでき、海浜へのアクセスは非常に良い。対照的に大磯港～小田原港では海岸線に沿って走る西湘バイパスにより居住域と海岸域が切り離された状態にある。海岸に出るには地下道または橋梁を利用しなければならない。とくに地下道は閉空間であり、海岸の持つオープンスペースと逆に心理的圧迫感をもたらす。さらに、そこは多くの場合快適な状態におかれにくいため、利用者の海岸に対するイメージを著しく傷つけることになる。したがって、設計にはこれらの点も十分考慮すべきである。この地域での居住域と海岸域の親密度は、横断施設の間隔すなわちアクセス距離が目安となる。西湘地域でのアクセス距離を地区別にとめると、図16.16となる。どの地区の場合もアクセス距離は100 m以上であり、特に大磯では600 mにもなっている。居住域と海岸域との遊離が強くなければ、海は親しみ易さをなくしてしまうことになる。海岸を隔離された空間にしないためには、上記のアクセスの問題についても配慮が必要である。

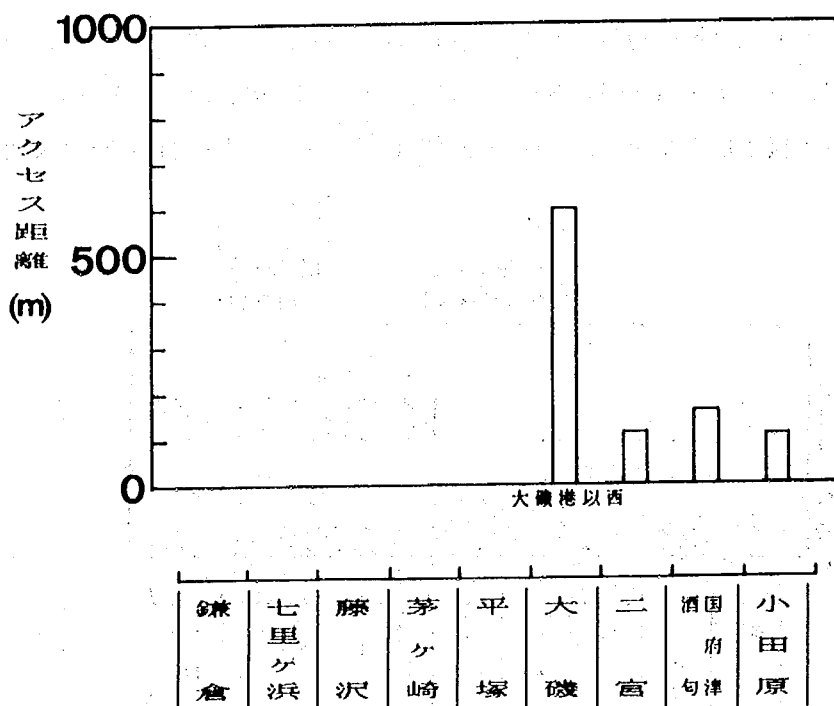


図 16.16 海浜へのアクセス距離の地域別分布

16.5 考 察

前章までに明らかになった諸条件，問題に対し，多面的に考察する。まず，地理的条件から得られた問題点について取り上げる。湘南海岸の沿岸域の都市化は市街地を増やし，樹林地の減少を招いた。現在でも樹林地率は全域で約10%と少なくなっている。今後も市街地化が益々進むと考えられるが，豊かな住環境を望む傾向から緑化への要求が高くなると思われる。したがって，今後の沿岸域開発においては，単に砂浜を広げるのみではなく，併せて広い緑地をも創出する必要がある。この場合，海浜の自然状況は厳しく，単なる植樹を考えるのでは不十分であり，木の種類やその景観にもたらす影響などについて検討すべきである。

次に海岸工学的条件について考察する。当沿岸域は，一部の区域を除いて侵食傾向にあり，1954年から1983年の間で平均50m程度汀線が後退した。湘南海岸はその交通至便さや，人口密度の高い首都圏に近接していることなどの立地条件から多目的な海洋空間として期待されている。海岸侵食に対し，従来より使われている離岸堤等の工法を用いると，良好な景観を失う危険性が高い。そこで，今後の開発においては養浜工法や，海域制御構造物などが適すると思われる。しかしながらこれらの工法の利用を計画する場合，画一的な検討，すなわち湘南，西湘いずれにおいても同種の工法を利用する案は合理的ではないことに注意すべきである。例えば西湘地域では湘南地域に比較して海底勾配が急であるから構造物に作用する波力は著しく大きくなるはずである。

津波，高潮の対策では湘南地域で計画高に対する切欠が多く，対策が必ずしも十分ではないようである。特に広い砂浜，保安林などを持たない鎌倉～七里ヶ浜地域では他に比較して安全性が低い。

海洋性レクから見た条件につて述べる。海洋性レクのポイント，施設は湘南地域から近隣の三浦海岸にかけての地域に集中している。また，湘南地区では，観光客，海水浴客の入込数に見られるように利用度も高い。しかしながら，湘南地域～三浦海岸では海洋性レクの過密化が進んでおり，海水浴場の混雑度はひどく，マリナーなどの施設も飽和状態にある。そこで，湘南海岸の総合的な整備を図るために以下のような方策が例として考えられる。

鎌倉～藤沢では現在海水浴場の混雑度は著しく高いが，その他の海洋性レクの利用はあまり図られていない。そこで今後はより広範な利用が行われるように，種々の海洋性レク施設の充実を図る必要がある。海洋性レク全般に関し，比較的利用度の低い茅ヶ崎以西の地域では，現在適地と呼ばれる場所の諸条件を海域制御構造物などにより模倣し，良質な環境を創り出す努力が必要であろう。これにより湘南東部と三浦海岸での過度の集中と偏向は防ぐことが出来る。ただし，海底勾配などによる条件を考えると，マリナーやヨットハーバー等の施設は西湘地域では設置が難しく，比較的勾配の緩い鎌倉～大磯間で計画されることが望ましい。

リゾート地および観光地の立地条件の検討では，アクセス面からも考察する必要がある。当海岸は全域にわたり公共交通機関から海岸への時間距離が非常に短く，また全域に海岸道路があり，車両による交通も至便である。このことから，海岸へのアクセスは良い条件を持っていると言える。しかしながら，

海岸道路は渋滞が慢性化し、交通状況はあまり良いとは言えず、また、大磯周辺では自動車専用道路である西湘バイパスのために砂浜へのアクセス距離が長く、陸、海域空間の隔離が起こっている。交通渋滞の緩和を図るために道路の拡幅等を行えば、他地区においてもこのような海岸域の隔離が起こる可能性がある。計画上望まれるのは多くの人間が容易に砂浜にアクセスでき、また海洋が本来有する開放性を取り入れることである。海域と陸域のつながりのある方法での対処が必要である。

16.6 結 論

湘南海岸を例として、今後海岸域を多目的に利用しようとする場合の問題となる点をまとめると次のようになる。

- ① 市街地の増加および樹林地の減少は全地域で生じている。市街地率と樹林地率には相関が見られる。市街地で変遷が激しかったのは酒匂・国府津および平塚～七里ヶ浜の地区である。これら各地区では、1947 年以降約30年間で市街地率が10～20%から70～95%へと増加した。樹林地で変化が大きかったのは七里ヶ浜である。1948 年からの30年間で樹林地率は約60%から約10%に減少した。
- ② 水深20mまでの等深線距離は小田原から鎌倉へ接近するほど長くなり、浅海域での海底勾配は緩くなっている。
- ③ 1954年から1983 年の間に汀線が前進したのは姥島から江ノ島の区間と押切川河口部および森戸川河口部である。他地域では1954 年からの29年間で平均50m程度の後退があり、特に相模川河口東部や酒匂川河口東側隣接区域で100 m以上の後退が見られる。
- ④ 海岸保全施設の計画高に対する堤防天端高および背後の最高地盤高の切欠面積は湘南地域で大きく、特に茅ヶ崎、藤沢地域がきわだっている。
- ⑤ 年間観光入込数は鎌倉が約2000 万人、藤沢が約1200 万人と多く、その他は500 万人以下と湘南地域に偏っている。
- ⑥ 海洋性レクのポイント、施設は湘南地域～三浦海岸に分布が集中し、海洋性レクの過密化が進んでいる。しかしながら多目的な利用は必ずしも図られてはいない。
- ⑦ 湘南海岸のどの海水浴場においても、一人当りの砂浜面積は約1 m²/人と著しく狭い。
- ⑧ 海岸域への交通は至便であるが、海岸道路の混雑は慢性化しており、特に国道134号線の平塚から藤沢間の混雑度は1.5を越えている。
- ⑨ 西湘地域ではバイパスにより居住域と海岸域が遮断され、アクセス距離は100 m以上となっている。特に大磯では600 m以上である。

以上の問題点は多面的であって、その解決は容易ではない。しかし時間が経過すると条件はさらに悪化する方向へと変化するであろう。この意味でこれらの問題を積極的に解決しなければならないが、今後の計画を立案する上で次の点に留意する必要がある。

- ① 沿岸の樹林地を保全するとともに、新たに緑化も図ることにより環境条件を向上させる。
- ② 侵食対策、海岸保全を行うに当たっては地域の地理的、海岸工学的条件を十分に考慮する。画一的な方策や工法を選択することは合理的でない。
- ③ 海洋性レクのポイントおよび施設の開発は、海域制御構造物などにより適地での条件を模倣する方策により行うべきである。ただし構造物を設置すると期待する効果以外の影響も副次的に生ずるので、このような点についても十分検討する必要がある。
- ④ 居住域と海岸域との隔離を招くような計画はとるべきでなく、多くの人が容易にアクセスでき、しかも海洋が持つ広さや豊かさを味わえる空間を創出することが大切である。

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，173p.，1987.
- 2) 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（2），土木研究所資料，第2510号，138p.，1987.
- 3) 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（3），土木研究所資料，第2511号，168p.，1987.
- 4) 宇多高明・村井禎美・藤原隆一・松尾和男：海洋空間創出のための海域制御構造物の開発，海洋開発論文集，vol.2, pp. 121 ~ 126, 1986.
- 5) 十代田朗・渡部貴介・安島博幸：明治・大正期における湘南及び房総地域の臨海部別荘地の成立過程，第20回日本都市計画学会学術研究論文集，pp. 331 ~ 336. 1986.
- 6) 宇多高明・矢野滋：相模湾西湘海岸の侵食実態について，地形，第8巻，第1号，pp. 1 ~ 19, 1987.
- 7) 日本観光協会：全国観光情報ファイル，第6巻，富士，箱根・伊豆，1984.
- 8) 実業之日本社：ブルーガイド情報版横浜，鎌倉，湘南，1958.

第17章 あとがき

本報告書では、61年度より研究を続けている多くのタイプの構造物について、主にその消波効果、波力特性等を明らかにした。また海洋構造物の重要な問題である洗掘については、駿河海岸沖の海洋技術総合研究施設での現地観測により検討した。さらに、海岸利用と保全のあり方を検討するために、ケーススタディとして湘南海岸を選び、自然、社会条件を整理し幅広い見地より今後の海岸利用・保全について考察した。今後は、各種海域制御構造物の効果のみならず、その実用化手法についての問題点を検討するほか、海洋開発の適地と考えられる諸海岸の自然、社会的特性も検討していく予定である。

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…………新日本製鐵(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

土木研究所資料No.2510 : 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(2)

はじめに

1. まえがき
2. 研究の目的
3. 研究の体制
4. 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(株)…………
5. 空気潜袋式没水型海域制御構造物の水理特性…………(株)間組…………

6. 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)……(株)大林組……
7. 球面浅瀬式没水型消波構造物の消波特性……東洋建設(株)……
8. 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(株)……
9. 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(株)……
10. 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(株)……
11. 斜板消波潜堤に関する研究……大成建設(株)……
12. 円形消波潜堤に関する研究……大成建設(株)……
13. あとがき

土木研究所資料No.2511：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(3)

—— 第1グループ F・S・調査報告書 ——

1. はじめに
2. F・S・のための計画条件
 - 2.1. 構造タイプ
 - 2.2. 設計条件
 - 2.3. 施工条件
3. 設計・施工検討
 - 3.1. スリット型(ブロックと杭)
 - 3.2. 多重スリット型(ブロックと杭)
 - 3.3. 水平板付きスリット型1(ブロックと杭)
 - 3.4. 水平板付きスリット型2(ブロックと杭)
 - 3.5. 水平板付きスリット型3(ブロックと杭)
 - 3.6. スリット型(ケーソンと杭)
 - 3.7. 透過水平板付きスリット型(ケーソンと杭)
 - 3.8. 中詰型(ケーソンと杭)
 - 3.9. 改良空気密閉型(ブロックと杭)
4. 設計・施工法の比較
 - 4.1. ブロック構造の設計・施工法の比較
 - 4.2. ケーソン構造の設計・施工法の比較
5. 今後の課題
6. あとがき

海域制御構造物の開発に関する
共同研究報告書 (4)

ISSN 0386-5878
土研資料第2577号
昭和63年2月(1988)

要 旨

各種の海域制御構造物の消波効果，作用する波力について水理模型実験を行い検討した。実験結果から各構造物の消波特性，作用する波力特性を明らかにした。

キーワード：海洋開発，共同研究，海域制御構造物，消波特性，波力特性



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地
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 2577 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印