

多段水平板式透過性防波堤の消波特性

Wave Dissipating Characteristics of Permeable Breakwater

Composed of Multiple Horizontal Plates

新田 良典 *・山西 博幸 *

Yoshinori, Nitta and Hiroyuki, Yamanishi

The permeable breakwater which can be calmed severe wave condition's coastline down and having a water circulation system to prevent the deterioration of water quality, has been developed. This structure is composed of prefabricated multiple horizontal and vertical plates which is aiming the prefab works.

This paper deals with the hydraulic model test in order to select the most suitable structural-form for the wave dissipation. As the results of tests, characteristics and mechanism of wave dissipation are cleared, and obtained the satisfactory structural-form.

Keywords: Permeable breakwater, Characteristics of wave dissipation, Model test.

1. はじめに

従来の護岸や防波堤に代表される港湾構造物は沿岸域の保全を第一に考えたもので、外海と内海を壁状の構造物で波を遮断し、静穏な水域を保持する形式であった。しかし、近年、この形式による弊害として、海水流通の阻害による水質の悪化、堤体前面の反射波の増大による小型船舶の航行に対する支障等の問題が指摘されている。また、最近の構造物の大型化に伴い、製作ヤードを確保することが困難となっている。このような背景より、筆者らは、波浪の厳しい沿岸域の静穏化を図り、水流の透過性に富み、かつ構造物のプレハブ化施工を目指して水平板と鉛直板を多段に構成した透過性の防波堤を考案し、反射率、透過率等の消波特性に関する水理模型実験を行った。本実験は、消波性能の優れた構造形式を選定することを目的とし、防波堤の構成条件の諸元変化と消波性能の関係を調べ、構造形式の最適化を図った。なお、要求される消波性能は構造物の目的、用途によって異なるものと思われるが、ここでは、開発に際しての消波性能の目標値として、既往の研究¹⁾で用いられている値を採用し、反射率 ≤ 0.5 、透過率 ≤ 0.6 と設定した。

実験の結果、消波特性および消波のメカニズムが明らかとなり、目標値を満足する構造形式が得られた。

2. 実験条件および方法

2.1 実験方法

実験は、図-1に示すような全長15m、幅0.3m、高さ0.45mの反射波吸収式造波水路を用いて行った。水路床には1/30の様な海底勾配を設け、水深が0.2mとなったところで水平床とし、この平坦部に模型を設置した。模型の前後には容量式波高計を所定の位置に設置し、沖側2台(N0.1, 2)で反射波高を、岸側2台(N0.3, 4)で透過波高を測定した。なお、実験はすべて規則波で行った。

2.2 実験模型

実験縮尺は、フルード相似則を適用し1/50とした。実験で使用了模型の基本形状は写真および図-2に示すように、水平板と鉛直板を多段に組合せ、波に対する安定性を考慮して台形状とし、断面中央に遊水部を設けている。

本実験は、消波性能の優れた構造形式を選定することであり、そのため、基本型模型をベースに種々の構造条件を変化させ行った。模型の型式は基本型も含め大別して4種類とし、空隙率、底板厚さ等もパラメータとした。実験に使用した模型の形状を図-3に、その諸元を表-1に示す。また、各形

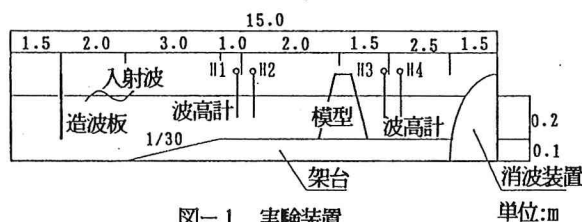


図-1 実験装置

単位:m

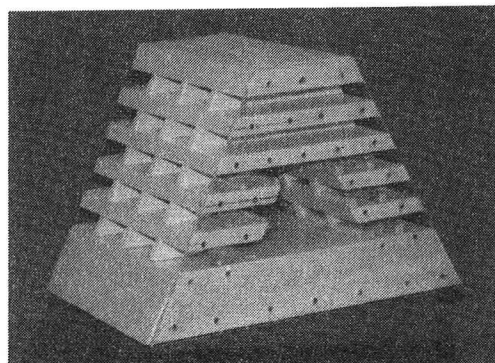


写真 実験模型

* 正会員 (株)熊谷組 技術研究所 (300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043)

式の特徴および狙いとしている消波機能について以下に記す。

- (1) 基本型 …… 消波機能の概念は、①不透過部材での反射による消波、②静水面付近の波を水平板間内に通過させ、波の鉛直運動を抑制し、波から流れに変換し消波、③後部の不透過部材および遊水部で乱れを発生させ、波エネルギーの損失による消波、等の機能をもたせた形状。
- (2) 開放型 …… 基本型のうち、静水面付近の水平部材に開口を設け、揚圧力の低減および遊水部からの逆流効果により消波機能をもたせた形状。
- (3) 段違い型 …… 後面の水平部材を前面と段違いに設け、波の反射、乱れを増大させることによる消波機能をもたせた形状。
- (4) 突起型 …… 水平板に突起を設け、渦、乱れを発生させ、波エネルギーの損失効果による消波機能をもたせた形状。

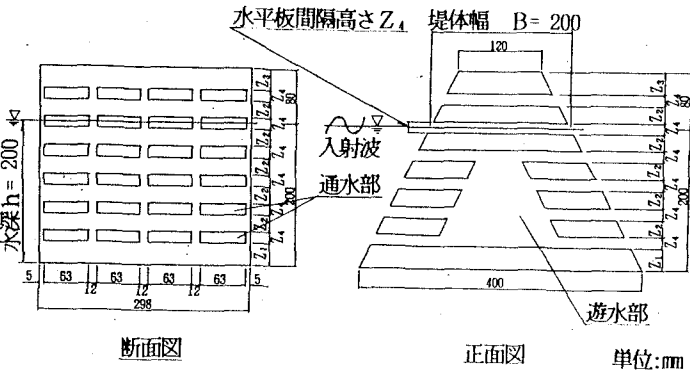


図-2 模型の断面図及び側面図

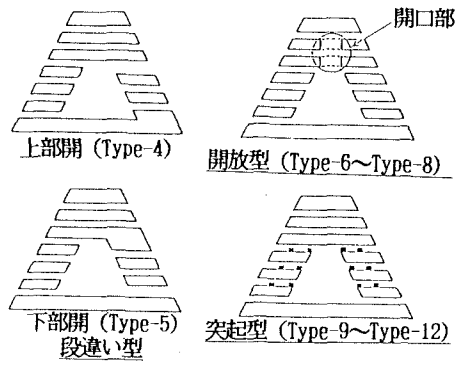


図-3 各種実験模型

2.3 実験ケース

構造型式は模型4種類の12形状で、波浪条件は表-2に示すように16ケースとした。実験全体のケース数は192ケースであった。

2.4 解析方法

消波性能は、反射率 K_R 、透過率 K_T 、およびエネルギー損失率 K_L^2 で評価した。反射率 K_R は、合田らによる入射波分離推定法を用いて反射波高 H_R を求め、式(1)で算定した。

$$K_R = H_R / H_I \quad (1)$$

なお、入射波高 H_I は模型を設置しない状態での模型位置における波高とした。

透過率 K_T は、模型背後に設置した波高計のデータを同様に入射波分離を行い、透過波高 H_T を求め、式(2)により算定した。

$$K_T = H_T / H_I \quad (2)$$

エネルギー損失率 K_L^2 は式(3)より算定した。

$$K_L^2 = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (3)$$

なお、エネルギー損失率の目標値は、(3)式に反射率、透過率の目標値を代入して求め、 $K_L^2 \geq 0.4$ とした。

3. 理論解析

水面に配置された物体による波の変形や物体の運動に関する境界値問題の解析手法の一つとしてポテンシャル接続法がある。本構造体に対し、この解析手法を用いて厳密解を求めるには、その境界条件の与え方に工夫を要する。しかしながら、本実験で用いた構造形を簡単な解析モデルとして取り扱い実験結果を概略説明することは可能である。ここでは、実験で用いた堤体の構造を一様な透過性体と仮定し、ポテンシャル接続法の選点解法を用いて理論解析を行った。以下にこの理論を簡単に説明する

図-4に示すように、水深 h の場所に幅 $2L$ の透過性防波堤があり、ここに周波数 σ の波が入射する。各領域の

表-1 模型諸元

構造 型式	前面空隙率 ϵ					段違い 箇所	開口 箇所	突起 箇所
	Z_1 (cm)	Z_2 (cm)	Z_3 (cm)	Z_4 (cm)	ϵ			
基本型	TYPE-1	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	—	—
	TYPE-2	3.35	1.8	3.05	2.1	0.4	—	—
	TYPE-3	7.25	1.8	3.05	2.1	0.3	—	—
段違い型	TYPE-4	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	上部開	—
	TYPE-5	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	下部開	—
開放型	TYPE-6	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	上部	—
	TYPE-7	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	下部	—
	TYPE-8	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	上下部	—
突起型	TYPE-9	7.25	1.8	3.05	2.1	0.3	—	底板部04 (突起高さ5mm)
	TYPE-10	7.25	1.8	3.05	2.1	0.3	—	前面・後面水平板上 (5mm)
	TYPE-11	7.25	1.8	3.05	2.1	0.3	—	前面水平板 (5mm)、後面 (1cm)
	TYPE-12	3.2	2.4	3.2	1.6	0.3	—	前面水平板 (5mm)、後面 (1cm)

表-2 波浪条件

Wave NO.	波高 H (cm)	周期 T (sec)	波長 L (cm)	波形変形 H/L	Wave NO.	波高 H (cm)	周期 T (sec)	波長 L (cm)	波形変形 H/L
1	2	0.57	50	0.040	9	6	0.85	97	0.062
2	2	0.85	97	0.021	10	6	0.99	120	0.050
3	2	1.13	142	0.014	11	6	1.41	184	0.033
4	2	1.41	184	0.011	12	6	1.70	227	0.026
5	4	0.71	74	0.054	13	8	0.99	120	0.067
6	4	0.85	97	0.041	14	8	1.13	142	0.056
7	4	1.13	142	0.028	15	8	1.41	184	0.043
8	4	1.70	227	0.018	16	8	1.98	268	0.030

速度ポテンシャルを $\phi(x, z; t) = \phi(x, z)e^{i\omega t}$ の形で表せば、水底および水面条件を満足する Laplace equation の領域 I、II の一般解 ϕ_1 、 ϕ_2 は次式で表せる。

$$\phi_1(x, z) = (Ae^{ik(x-L)} + Be^{-ik(x-L)}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{k_n(x-L)} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi_2(x, z) = (Fe^{-ik(x-L)}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n e^{-k_n(x-L)} \frac{\cos k(z+h)}{\cos kh} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 k および k_n 次式で決まる固有値である。

$$\sigma^2 h / g = kh \cdot \tanh kh = -k_n h \cdot \tan k_n h \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

また、容積率 V （空隙容積／堤体容積）をもつ領域 II の空隙物質内の流体運動に対して、抵抗は流速に比例するものとし、その比例定数を μ とすると、領域 II は領域 I、III と同様にして、Laplace equation と境界条件を満足する速度ポテンシャル ϕ_2 は次のように表せる。

$$\phi_2 = \sum_{n=0}^{\infty} (Dr \frac{\cos krx}{\cos krl} + Er \frac{\sin krx}{\sin krl}) \frac{\cosh kr(z+h)}{\cosh krh} \dots\dots\dots (6)$$

($r=0, 1, 2, \dots$)

ただし、 kr は次式で決まる複素数固有値である。

$$krh \cdot \tanh krh = (1-i \mu / \sigma) \cdot \sigma^2 h / g \quad (r=1, 2, 3, \dots)$$

また、境界条件として水平流速と圧力の連続性によって、次の条件が成り立たなければならない。

$$\partial \phi_1 / \partial x = \partial \phi_2 / \partial x, \quad \phi_1 = \beta \phi_1 \quad \text{at } x=L \dots\dots\dots (7)$$

$$\partial \phi_2 / \partial x = \partial \phi_3 / \partial x, \quad \phi_2 = \beta \phi_2 \quad \text{at } x=-L \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $\beta = (1-i \mu / \sigma) / V$

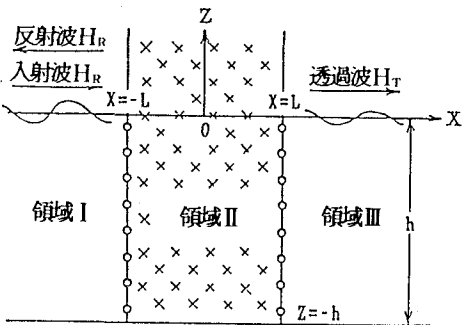


図-4 解析モデル

4. 実験結果及び考察

4.1 基本型模型 (TYPE-1, TYPE-2) の消波特性

図-5 は基本型で、空隙率 ϵ （通水面積／堤体面積 $D \times h$ ）を $\epsilon=0.3$ (TYPE-1)、 0.4 (TYPE-2) と変化させ消波性能の比較を行ったものである。図-5 の縦軸はそれぞれ反射率 K_R 、透過率 K_T およびエネルギー損失率 K_L で、横軸は幅・波長比 B/L をとって整理した。これより、空隙率 ϵ の変化にかかわらず、 K_T は B/L の増加に伴って減少するが、 K_R はさほど大きな変化は見られない。本構造形式では B/L の変化に対して K_R よりも K_T の変化が著しく、特に、 $B/L > 0.25$ の領域から K_T は大きく低減する。 K_R に関しては、堤体幅 B よりも空隙率 ϵ に大きく影響されるものと思われる。

反射率 K_R と透過率 K_T の変化幅は、 $\epsilon=0.3$ の場合、 K_R は $0.35 \sim 0.62$ 、 K_T は $0.15 \sim 0.55$ 、 $\epsilon=0.4$ の場合では、 K_R は $0.30 \sim 0.55$ 、 K_T は $0.2 \sim 0.68$ の範囲にあり、両者とも K_R 、 K_T の目標値を同時に満足することができなかった。エネルギーの損失率 K_L に関しては、その変化幅は $0.3 \sim 0.9$ の範囲に分布し、 B/L が 0.3 付近で最大となり、その後はほぼ一定値となる傾向を示している。また、本構造形の特徴として、既往の同種の構造物に比べ、長周期側においてエネルギー損失が比較的大きく、長周期の波に対する消波効果の有効性が挙げられる。

次に計算結果と実験結果との比較を行う（図-5 参照）。ここでは、理論的取扱を簡単にするために、透過性体内の流体運動に関する抵抗を流速に比例する定数として μ / σ のみを変化させ計算した。実験値として TYPE-1 ($\epsilon=0.3$)、TYPE-2 ($\epsilon=0.4$) のデータをプロットした。なお、堤体前面での空隙率 ϵ を図中の容積率 V に換算すると、 $\epsilon=0.3, 0.4$ はそれぞれ $V=0.5, V=0.6$ となる。 $B/L \leq 0.15$ では、両者に若干の差が生じるものの、計算値は実験値をおおむね評価していることがわかる。したがって、本堤体を一様透過性体であるとモデル化しても、その近似解は実験値を概略推定できること

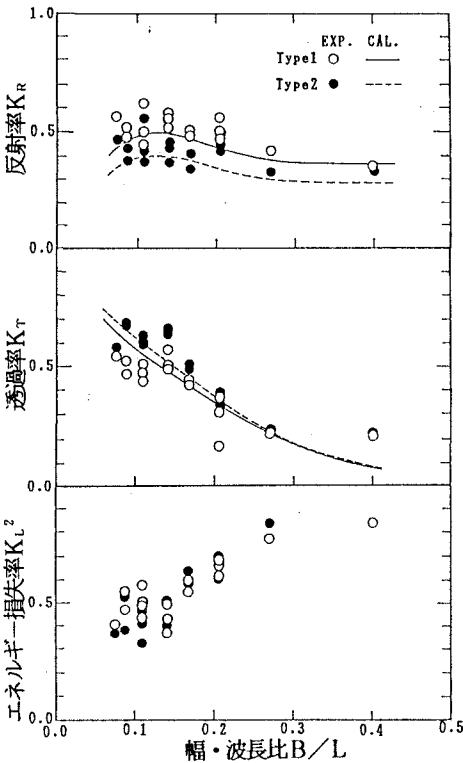


図-5 Type-2とType-11 の消波特性の比較

が確認された。

図-6は、TYPE-2の波形勾配 H/L と K_R 、 K_T および K_L^2 との関係を示したものである。KRに関しては、図-5の B/L を横軸にとった場合と同様、 H/L に対し大きな変化はみらず、 K_R の範囲は0.3~0.55である。 K_T に関しては、 H/L との相関がないように見えるが、波高・水深比 H/h をパラメータとして整理すると、 H/L と K_T の傾向が読み取れる(図-7参照)。すなわち、同一波高のもとでは、周期が長いと K_T は大きくなる。また、 H/h の増加に対しても K_T は大きくなるが、 H/h 別の変化率は小さくなる傾向にあることがわかる。

4.2 空隙率 ϵ が消波特性に及ぼす影響

一般に、空隙率 ϵ は透過率よりも反射率に影響を及ぼすものであると考えられており、本実験においてもその傾向は変わらなかった(図-5参照)。すなわち、 $\epsilon=0.3$ よりも $\epsilon=0.4$ の方が K_R は小さくなり、逆に、 K_T は大きくなる。したがって、反射率は $\epsilon=0.4$ より0.3が、透過率は $\epsilon=0.3$ より0.4の方がこれらを低減させるのに効果的である。また B/L の変化に対して K_R はほとんど変化しないが、 K_T は $B/L>0.25$ において大きく低減し、波周期と空隙率の両方の影響を受けることがわかった。次に、エネルギー損失率 K_L^2 の比較では、長周期域において、 $\epsilon=0.3$ の方が $\epsilon=0.4$ よりも損失が大きいが、 $B/L>0.15$ からは両者に差異はみられない。これよりエネルギー損失的には $\epsilon=0.3$ の方が効果的であると言える。

4.3 底板厚さの違いが消波特性に及ぼす影響

模型のTYPE-3(底厚型)は、表-2に示すように水平板間隔高さ Z_4 はTYPE-2と同じで、底板厚さ Z_1 を約2倍にし、空隙率を $\epsilon=0.3$ としたものである。これは、図-5に見られるように、目標値に対して $\epsilon=0.4$ では K_R はほぼ満足し、 $\epsilon=0.3$ では K_T に若干余裕があるため、底厚型は $\epsilon=0.3$ と $\epsilon=0.4$ の中間的な値を狙った型式である。図-8は $\epsilon=0.4$ のTYPE-2と底厚型のTYPE-3を比較したものである。底板を厚くしたものは、厚くしていないものに比べて K_R は若干大きくなるものの、 $\epsilon=0.4$ では消波できなかった長周期の透過波を低減させることができる。これは、波長の長い波は水底付近までエネルギーを持っているため、底板を厚くすることによる波エネルギーの反射効果が起因しているものと思われる。以上から、底板を厚くすることは、長周期の波に対して、透過率の低減に有効な手段であることがいえる。なお、ここには示していないが、底厚型の K_R 、 K_T は予測通り図-5の $\epsilon=0.3$ と $\epsilon=0.4$ の中間的な値を示していた。

4.4 段違いおよび開口が消波特性に及ぼす影響

段違い型は、後方の水平板を段違いにすることにより、堤体内に進入してきた波に対し、乱れを発生させ、エネルギー損失の増大を図ったものであるが、基本型(TYPE-1)との差異はほとんどなく、その効果は見られなかった。また、開放型についても透過率の低減効果は若干見られるものの、基本型とに顕著な差異はなく、期待していたほどの波エネルギーの逸散効果はないことがわかった。したがって、静水面直下の水平板は基本型のままでよいと判断される。

4.5 突起が消波特性に及ぼす影響

図-9はTYPE-11(水平板上に突起を設けた場合)とTYPE-3(突起を設けない場合)の結果を比較したものである。本来、反射率と透過率とは相反関係にあり、空隙率や底板厚さ等の変化だけでは、与えられた条件に対して両者を同時に満足させるには限度がある。そこで、両者を同時に小さくするためには、積極的に波のエネルギー

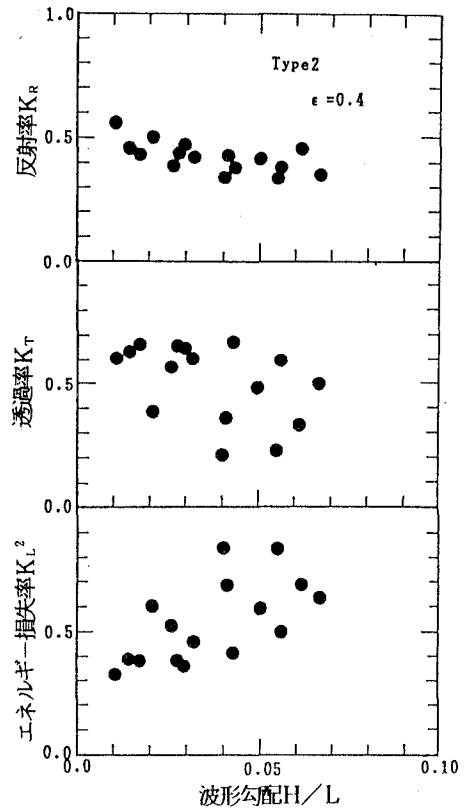


図-6 波形勾配 H/L と消波特性との関係 (Type-2)

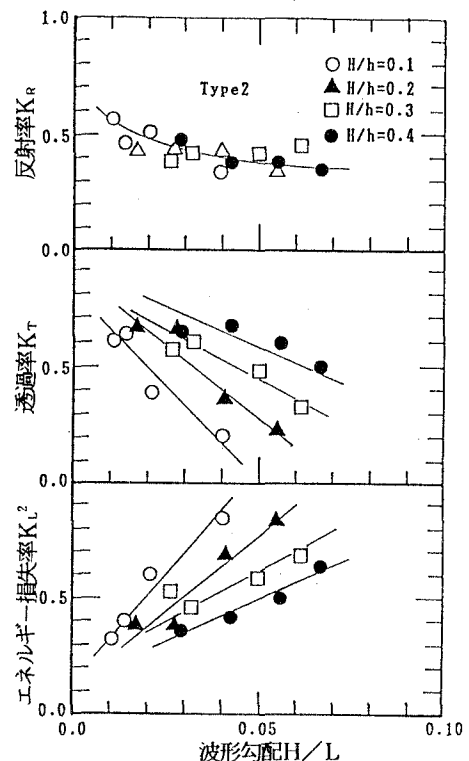


図-7 波形勾配 H/L と消波特性との関係 (波高・水深比 H/h をパラメータとしてとった場合)

を散逸をさせる必要があることから、水平板上に突起を設け、水粒子の攪乱を促進させ、エネルギー損失を増大させることとした。図より、 K_L^2 は大きく増加し、突起の効果が顕著であることがわかる。すなわち、突起がエネルギーの逸散効果に効果的であることが確認された。また、 K_R 、 K_T とも B/L の増加に伴い減少している。これより、堤体幅を大きくすることは、 K_R 、 K_T をともに小さくするのに有効な手段であると考えられる。

図-10は、突起が消波特性に及ぼす影響を明確に把握するためにTYPE-11とTYPE-3との K_R 、 K_T 、 K_L^2 の差分 ΔK_R 、 ΔK_T 、 ΔK_L^2 を示したものである。ここで、 ΔK_R および ΔK_T についてはマイナスとなるほど ΔK_L^2 に関してはプラスになるほど突起の効果があることを示す。反射率に関してはその差分がほぼ0付近に分布していることから、突起が反射率に及ぼす影響は少ないことがわかる。しかしながら、透過率とエネルギー損失率に関しては、その差が顕著に表れている。突起をつけたものとそうでないものとの差分値 $|\Delta K_T|$ と $|\Delta K_L^2|$ は0.1以上で、突起が透過率の低減に効果的であり、特に、長周期の波に対して有効であることがわかる。透過率の低減に関しては、突起によるエネルギー損失効果が大であるが、さらに、後部水平板上の突起を設けることによる通水面積の減少が、水塊の落込みによる二次的な乱れと波の位相差による戻り流れを抑制し、消波効果を上げている状況が実験中の観察から確認された。

図-11は、目標値($K_R \leq 0.5$ 、 $K_T \leq 0.6$ 、 $K_L^2 \geq 0.4$)に対するTYPE-1、3、11、12の実験結果をプロットしたものである。横軸に K_R 、縦軸に K_T および K_L^2 を同時に表示したもので、各々の構造形式に関する消波性能を一見して把握できるものである。これより、消波性能の目標値に対し、すべてを満足する構造形式はTYPE-11であり、本型式を消波性能に関して、最適な型式であると選定した。

なお、ここで、Type-12はType-1に突起を付けたものであり、空隙率 $\epsilon=0.3$ であるが、Type-11に比べ水平板間高さ Z_4 が小さい形状のものである。この形状の特徴は、反射率 K_R に関しては目標値を満足しなかったものの、その値はさほど大きくなく $K_R \leq 0.6$ であり、その反面、透過率 K_T は他の形状に比べ非常に小さく、 $K_T \leq 0.4$ で、平均的には0.25程度である。要求される消波性能に関しては、冒頭でも述べたように、構造物の目的・用途によって異なるものと思われる。したがって、Type-12もこの様な観点から見れば、消波性能に関して、最適形状のひとつであると考えられる。

5. まとめ

本研究より得られた成果をまとめると次の通りである。

(1) 基本型の消波特性として、幅・波長比 B/L の変化に対して反射率よりも透過率の変化が著しく、特に、 $B/L > 0.25$ の領域で、透過率は大きく低減する。また、反射率は堤体幅よりも空隙率に大きく影響される。

(2) 本堤体を一様透過性体と仮定し、堤体内の流体運動に対する抵抗を μ/σ のみを用いて計算を行った結果長周期域での計算値と実験値とに差が多少見られるものの、近似解は実験値をおおむね推定できることが確認された。

(3) 空隙率 ϵ を変化させた実験より、反射率は $\epsilon=0.4$ より0.3が透過率は $\epsilon=0.3$ より0.4の方がこれらを低減させるのに効果的であるが、エネルギー損失率からは $\epsilon=0.3$ の方が消波性能が良いと判断

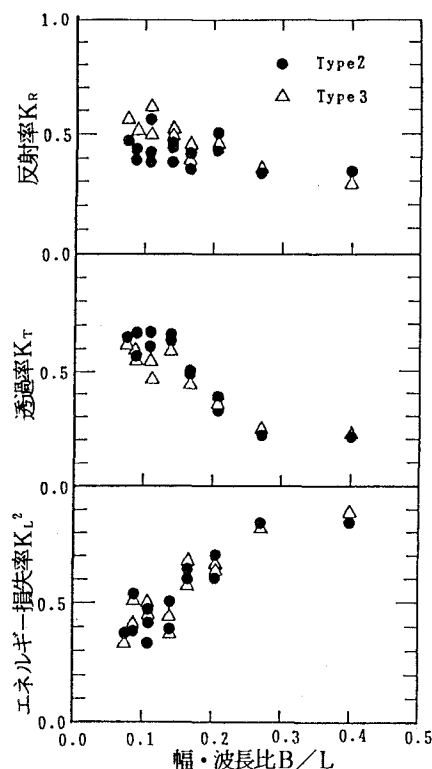


図-8 Type-2とType-3の消波特性の比較

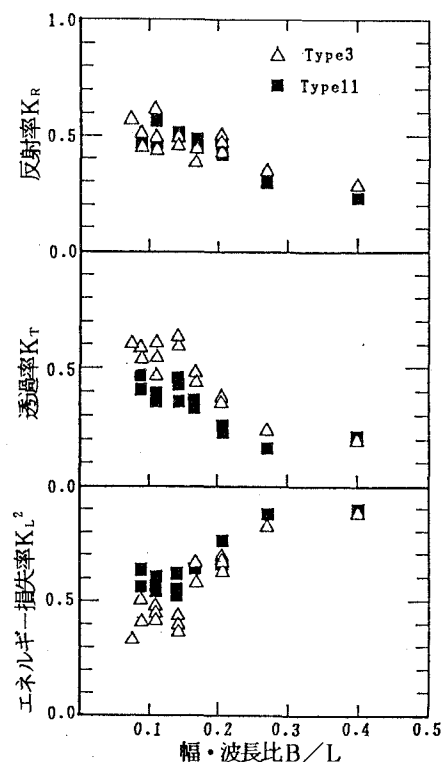


図-9 Type-3とType-11の消波特性の比較

される。

(4) 底板を厚くすることは、長波長域の透過率を低減させるのに効果的であることが確認された。

(5) 水平板に突起を設けた場合、反射率、透過率ともに B/L の増加に伴い減少する。これより、堤体幅を大きくすることは反射率、透過率を共に小さくするのに有効な手段と考えられる。また、突起をつけることによって反射率、透過率とも目標値を十分に満足する結果が得られ、さらに、他の形式に比べてエネルギー損失率も大きいことより、突起型を消波性能に関して最適な構造形式であると選定した。

6. おわりに

透過性防波堤の開発に際し、一連の模型実験により、消波性能の優れた構造形式が得られ、その消波特性と消波のメカニズムが明らかとなった。また、本報では触れなかったが、簡易的な可視化実験において、良好な水の循環現象も確認されている。今後は本構造物に作用する波力や安定性の検討と共に、厳密な解析を行うための新たなモデル化についても検討していく予定である。

<参考文献>

- 1) 宇多高明・村井禎美・松尾和男・藤原隆一(1987): 透過性消波構造物の消波効果からみた分類、第34回海岸工学講演会論文集、pp. 441~445.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976): 不規則波実験における入・反射分離推定法、港研資料No. 248、pp. 1~24.
- 3) 井島武士(1971): 最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用、水工学シリーズ71-B-1.
- 4) 吉田明德・小島治幸・鶴本良博(1990): 波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法、土木学会論文集、第 417号/ II-13、pp. 265~274.

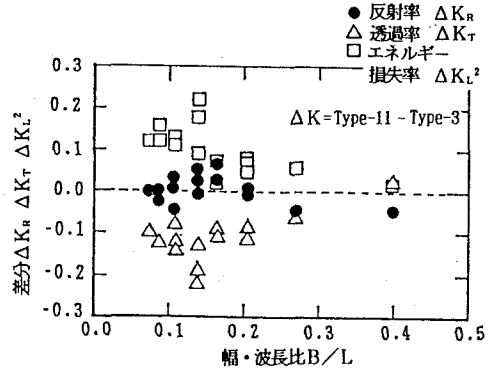


図-10 Type-3とType-11の消波特性の差

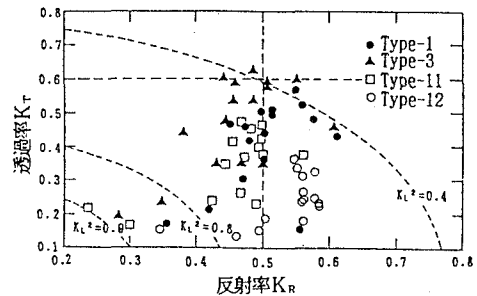


図-11 目標値に対するType-1, 3, 11, 12の消波特性