

多段水平板式透過性防波堤の消波および波力特性

Study on the Characteristics of Wave Dissipation
and Wave Force of a Permeable Breakwater

新田 良典 *・大本 晋士郎 *

Yoshinori Nitta and Shinjiro Oomoto

This paper deals with the characteristics of wave dissipation and wave force for the proposed breakwater. For the characteristics of wave dissipation, random wave experiment have been carried out to compare with the results of regular wave test which had been performed before. And still more, wave forces acting on this breakwater have been investigated by experiment used regular waves. Based on results, the calculation method of design wave forces can be applied to this breakwater are presented as well as the description of characteristics of wave reflection and transmission.

Keywords ; Permeable breakwater, Characteristics of Wave Dissipation, Design wave forces

1. はじめに

波浪の厳しい海岸域の静穏化を図り、反射波を軽減するための新しい透過性防波堤を提案し、この防波堤の消波特性に関する規則波実験結果はすでに報告¹⁾している。しかしながら、実海域における消波特性を検討するには、規則波実験の結果だけでは不十分であり、不規則波中での消波特性を把握しておく必要がある。また、本防波堤を実用化するためには消波特性のほかに構造設計、安定性等を検討するための波力特性を明らかにする必要がある。

本研究は、不規則波実験を実施し不規則波作用下での消波特性を把握するとともに、既報¹⁾の規則波による実験値との比較検討を行った。さらに、規則波実験による波力実験を行い、本防波堤に作用する波力特性を明らかにし、設計の際に必要な波力算定法を示した。

2. 実験の概要

2.1 実験の種類と実験水路

本研究において実施した実験は次の2種類である。

- (1) 消波特性実験
- (2) 波力特性実験

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。水路床は、既報¹⁾の規則波実験と同様に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。なお、消波特性実験での実験波は不規則波を、波力特性実験では規則波を用いて行った。

2.2 実験模型

消波特性実験で用いた実験模型は、消波性能の優れた最適構造形式のひとつとして選定された突起付底厚型 (Type-11 ; 海洋開発論文集Vol. 7, pp. 125 ~ 130 参照) とした。波力特性実験で用いた実験模型は、Type-11 から突起を除いた基本型 (Type-3) とした。ここで基本型とした理由は、突起が波圧に及ぼす影響は少ないこと、波圧計の取付けに突起が支障となることによる。模型の断面および正面図を図-2に示した。模型の設置水深は両実験とも20cmである。なお、実験縮尺はフルード相似則を適用し1/50とした。

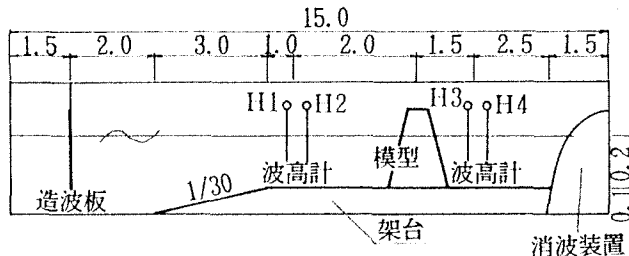


図-1 水路諸元 単位:m

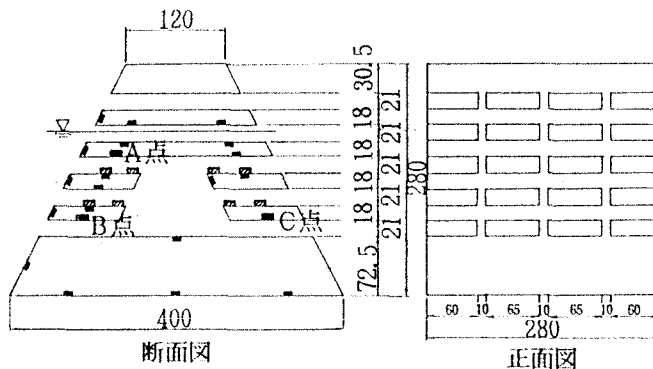


図-2 模型寸法(単位:mm)

(Type-11; ■の突起あり、Type-3; □の突起なし)

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

3. 不規則波による消波特性実験

3.1 実験方法

実験に用いた入射波はBretschneider・光易型のスペクトル特性を有するものとし、表－1に示すように有義波周期、有義波高を変化させた4種類の不規則波で行った。波高の計測は、図－1に示すように、模型の前後に容量式波高計を設置し、入・反射波は沖側2台(NO.1,2)の波高計で、透過波は岸側2台(NO.3,4)の波高計を用いて同時に記録した。入・反射波および透過波測定用の波高計間隔 Δl は両者とも15cmで一定とした。不規則波実験の場合、造波開始直後の波は非定常性が強く不安定なため、一定時間経過後の多重反射状態で波高の計測を行った。この際のサンプリング周波数は20HZとした。

波 浪 No.	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	有義周期 $T_{1/3}$ (sec)
1	4	1.13
2	4	1.41
3	6	1.41
4	6	1.70

表－1 不規則波の波浪条件

3.2 反射率および透過率の定義

不規則波実験より得られた波高データは、合田ら²⁾の手法を用いて入・反射波の分離を行い、入射波、反射波および透過波の各周波数ごとのスペクトル密度を算出した。これらのスペクトル形状を図－3の(a)(b)に示す。なお、スペクトル密度を算定する際の下限および上限周波数 f_{min} 、 f_{max} は通常、式(1),(2)を満たす値が用いられており、今回もこれによった。

下限 (f_{min}) : $\frac{\Delta l}{L_{max}} = 0.05 \dots (1)$

上限 (f_{max}) : $\frac{\Delta l}{L_{min}} = 0.45 \dots (2)$

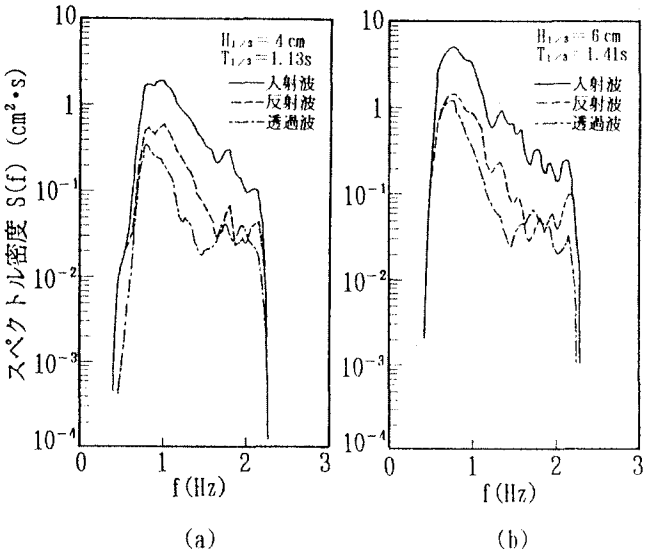
これらのスペクトル密度から反射率 $K_R(f)$ 、透過率 $K_T(f)$ およびエネルギー損失率 $K_L^2(f)$ の周波数応答関数を各周波数ごとに下式で計算した。

$K_R(f) = \sqrt{\frac{S_R(f)}{S_I(f)}} \dots (3)$

$K_T(f) = \sqrt{\frac{S_T(f)}{S_I(f)}} \dots (4)$

$K_L^2(f) = 1 - K_R^2(f) - K_T^2(f) \dots (5)$

ここに、 $S_I(f)$ 、 $S_R(f)$ および $S_T(f)$ は、各周波数 f での入射波、反射波および透過波のスペクトル密度である。

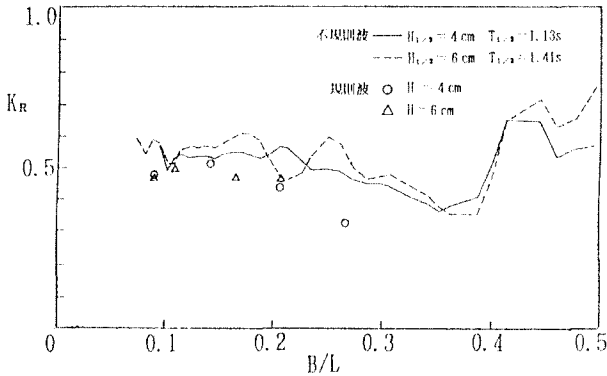


図－3 スペクトル形状

3.3 消波特性

図－4の(a)(b)(c)は、規則波と不規則波による実験結果を示したものである。図の縦軸は反射率 K_R 、透過率 K_T およびエネルギー損失率 K_L^2 で、横軸は堤体幅・波長比 B/L で整理した。反射率 K_R は B/L の増加に伴いゆるやかに減少し、 $B/L=0.4$ 付近で最小値を示すが、 $B/L > 0.4$ つまり短周期側では急激に K_R が増大する結果となった。この理由は、波エネルギーの高周波数成分は静水面近傍に集中しており、この成分が堤体頂部の不透過部で反射されたことによるものと思われる。

透過率 K_T と B/L の関係を見ると、 K_T は $B/L=0.25$ 付近で極小値を持つ放物線形状を成し、長周期、短周期側で増大する傾向を示している。しかしながら、 $B/L=0.1 \sim 0.4$ の範囲内では $K_T < 0.6$ であり、本防波堤は短周期側から長周期側までの幅広い範囲での消波性能を有していると言える。



(a) 反射率
図－4 消波特性

また、 $B/L < 0.1$ (0.65Hz), $B/L > 0.4$ (1.75Hz) の範囲では図-3のスペクル形状に示すように、波のスペクトル密度 $S(f)$ はピーク周波数に比べ $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) 程度低く、静穏度に対してほとんど影響を与えないものと考えられる。エネルギー損失率 K_L^2 は $B/L > 0.4$ 、つまり高周波数領域で0に近づき、エネルギーの逸散は高周波数ではほとんど行われなことがわかる。これに対し K_L^2 の高い範囲は $B/L=0.25 \sim 0.35$ で0.7以上を示す。

したがって、堤体幅 B の最適幅は設置海域の波浪の卓越周期を考慮し、この範囲で決定すれば良いものと判断される。次に規則波と不規則波の実験値の比較において、値に若干の差が見られるものの両者はほぼ一致している。これより、不規則波の代表波高として有義波高 $H_{1/3}$ を用いれば、有義波高から求められた反射率、透過率およびエネルギー損失率は規則波の実験値に対応することが確認された。したがって、規則波実験により得られた消波特性は、実海域における不規則波作用下においても概略適用が可能と思われる。

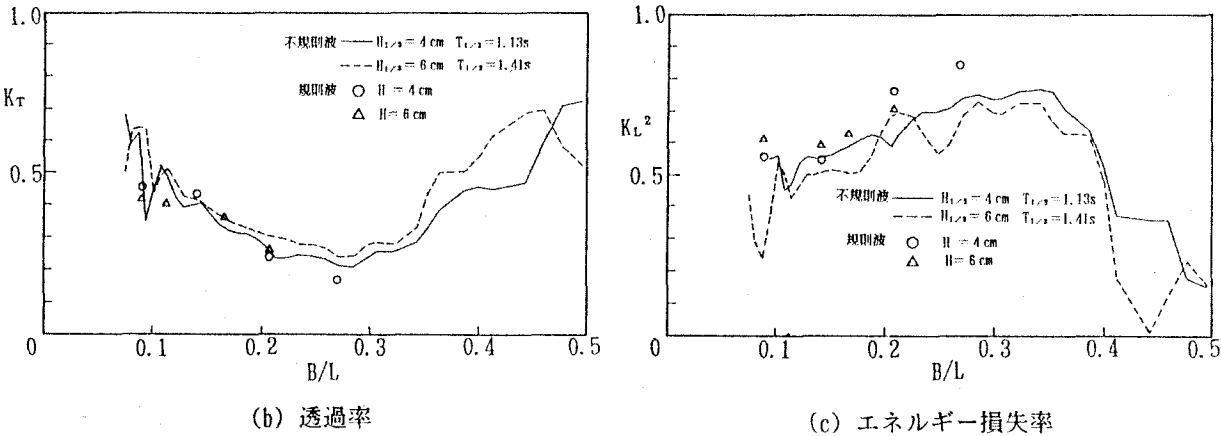


図-4 消波特性

4. 規則波による波力実験

4.1 実験方法

防波堤前壁面、底面、各水平板に作用する波圧および堤体全体に働く波力を調べるため、以下に述べる方法で実験を行った。本実験で使用した水路および模型は2.1.2.2で述べたとおりである。各部材に作用する波圧を測定するために、波圧計(定格100gf/cm²)を図-2の黒四角で示した箇所に取付けた。

また、三分力計を図-5に示すように模型上部に取付け、水平力、鉛直力モーメントの測定も同時に行った。実験は規則波を用い、表-2に示す10種類の波浪条件下で行った。

4.2 解析方法

波圧計と三分力計で計測したデータはペンレコーダーに出力し、その波形を直接読み取り解析を行った。なお、実験値は同一の波浪条件下で3回ずつ繰り返し測定したデータの平均値とした。

本防波堤に適用する設計波圧式の算定においては、実験値と合田波圧式³⁾との相関係数を求め、合田波圧式に低減係数を乗じる方法で求めた。

4.3 波力特性

防波堤前面の傾斜による影響として、堤体前面の各点に作用する波圧が最大となる時刻の位相差が予測されたが、今回使用した模型の傾斜角(63.4°)程度では顕著な位相差は見られず、各点はほぼ同時に最大波圧が作用していた。この結果については谷本らも同様な報告⁴⁾をしている。

つぎに、底面各点に作用する揚圧力の波形の時系列を図-6に示した。前趾が最大となる時刻にやや遅れて後趾が最大となることから、堤体前面と後面の水面変動を観測すると、堤体内の水流通過のため前面にやや遅れて後面の水位が変動しており、これに伴い堤体前趾と後趾の波圧変動差が生じている。前趾が最大となる時刻では底面圧力は合田式同様、後趾を0とした三角形分布となるが、その後、後趾波圧が増加し最大となり波圧分布は台形へと移行していく。この現象は透過性防波堤の特徴と言える。また、各点間の最大値が生じる位相差は、底面の前趾と後趾間で最も長く、水平板各点間の位相差に比べ約3倍と長かった。しかし、水平板上下面では位相差は見られなかった。

No.	周期(sec)	波高(cm)	No.	周期(sec)	波高(cm)
1	0.85	6	6	1.41	6
2	1.13	4	7	1.41	8
3	1.13	6	8	1.70	6
4	1.41	2	9	1.98	6
5	1.41	4	10	1.98	8

表-2 波力実験の波浪条件

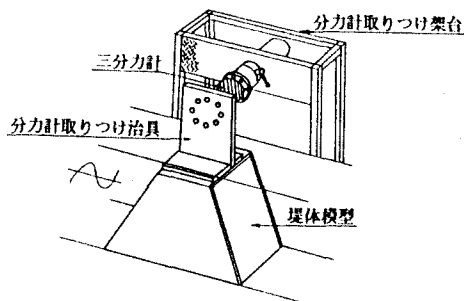


図-5 模型配置図(波力実験)

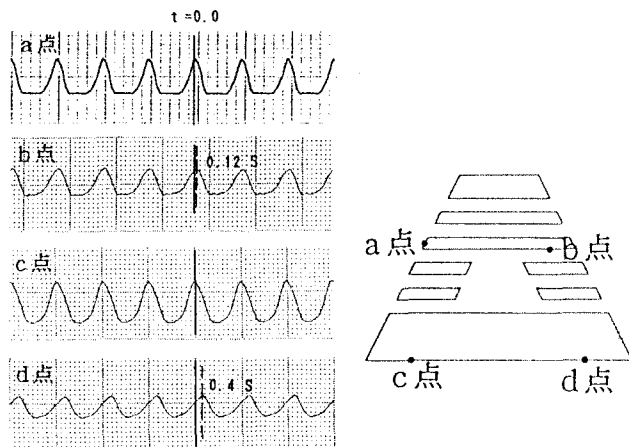


図-6 揚圧力の時系列データ
($T=1.98s$ $H=6.0cm$)

以上の結果より、底面後趾端の値以外はすべて最大値のみに注目し、各部材の設計波圧分布を次のように決定した。

(1) 前面、底面の波圧分布：図-7は堤体前面と底面各点の波圧の最大値をプロットしたものである。これより、波圧分布は合田式による分布と同様な波圧形状で堤体に作用することがわかる。波圧分布から算定した波圧合力について、合田波力と測定値との比較したものを図-8に示した。この図より、両者は良い相関を示しており最小二乗法からその傾きは0.75を得た。したがって、本防波堤の前面、底面の波圧分布は合田式に低減係数 λ を乗じることにより表すことができ、低減係数 $\lambda=0.75$ として、以下の式を前面、底面の設計波圧式とした。

$$\eta = 1.5 \lambda H \quad (6)$$

$$p_1 = \alpha_1 \lambda \omega_0 H \quad (7)$$

$$p_2 = p_1 / \cosh(2\pi h/L) \quad (8)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (9)$$

$$p_u = \alpha_1 \alpha_3 \omega_0 H \quad (10)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = 0 \quad (12)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{d}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(4\pi h/L)} \right\} \quad (13)$$

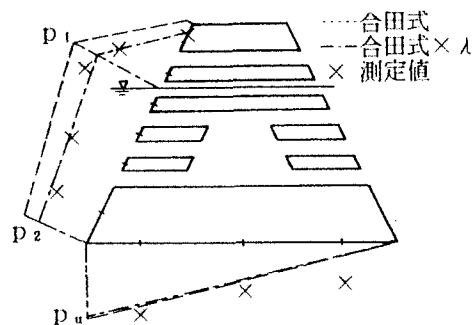


図-7 波圧分布($T=1.98s$ $H=6.0cm$)

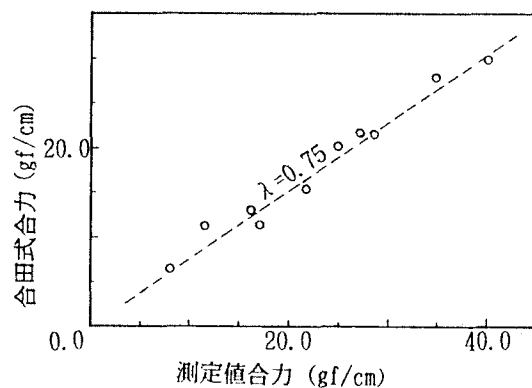


図-8 波圧低減係数の決定

ここで、 η ：静水面上波圧強度が0となる高さ(m)、 p_1 ：静水面における波圧強度(tf/m^2)、 p_2 ：海底面における波圧強度(tf/m^2)、 p_3 ：堤体底面における波圧強度(tf/m^2)、 p_u ：底面前趾における揚圧力強度(tf/m^2)、 h ：堤体前面の水深(m)、 d ：マウンド被覆工天端の水深(m)、 L ：波長(m)、 H ：波高(m)である。図-7にこの波圧式から求めた分布を一点鎖線で示したが、実験値と良好に一致していることがわかる。

(2) 水平板上下面の波圧分布：水平板上下面と合田式による前面波圧の比較の一例を図-9、図-10に示す。図-9から、図-1中に示したA点と前面波圧との関係は傾き0.75程度の直線関係となっている。また図-10は、図-1中のB、C点の波圧を比較したものであるが、遊水部付近の水平板上下面ではほぼ一様分布になることが分かった。このように前面波圧と各点間には非常に良い相関があり、各水平板の設計波圧式を以下のように決定した。なお、静水面付近の水平板には波の打ち上げによる衝撃波力の発生を示す波形が見られたが、その値はそ

れほど大きくなく波圧値は $2.0\omega H$ 以下であった。

- 1～3 段目上面：波の打ち上げによる衝撃波力の発生を示す波形が見られたが、その値は小さく、また前面波圧との相関性もないため、実験結果から $2.0\omega H$ の一様分布とした。ここで ω は水の単位重量、 H は波高である。
- 3 段目下面：前端が前面波圧 $\times 1/\lambda$ 、後端が 0 の三角形分布。
- 4 段目上面～5 段目下面：前後の水平板で測定された最大波圧はほぼ同じで、前面波圧に対する相関係数は 0.7～0.8 であることから、前面波圧 $\times 0.75$ の一様分布。
- 6 段目上面：前面波圧 $\times 0.9$ の一様分布。

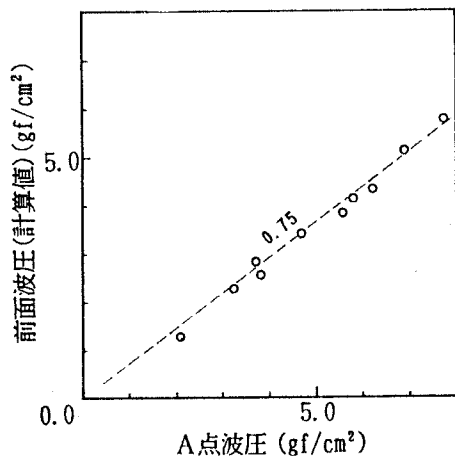


図-9 前面波圧-A点波圧比較

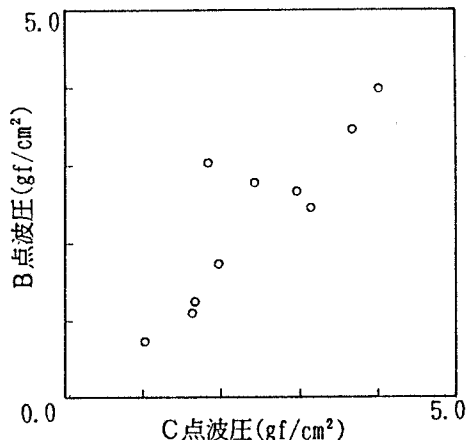


図-10 水平部材下面に作用する波圧
(5 段目前後)

(3) 設計波力と三分力計値との比較：堤体に作用する水平力、転倒モーメントについて、(1)、(2) で示した設計波圧式により算定した波力と、測定した値を比較したものを図-11, 12 に示した。この図より、両者は良好に一致しており、提案した設計波圧式の妥当性が確認された。

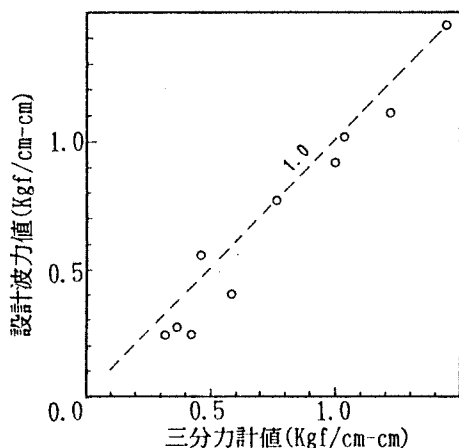


図-11 設計波力-三分力計値比較
(転倒モーメント)

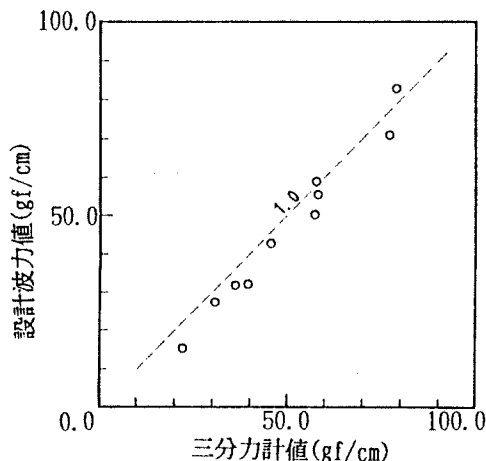


図-12 設計波力-三分力計値比較
(水平方向力)

5. まとめ

本研究より得た成果をまとめると次の通りである。

- (1) エネルギー損失率 K_L^2 は $B/L=0.25\sim0.35$ の範囲で高い値を示す。したがって、堤体幅 B の決定においては、設置海域の波浪の卓越周期を考慮し、この範囲で決めれば良いことがわかった。
- (2) 不規則波の代表波高である有義波高 $H_{1/3}$ から求まった反射率、透過率およびエネルギー損失率は規則波の実験値にほぼ一致し、規則波実験により得られた消波特性は、実海域における不規則波作用下においても概略適用が可能であることが確認された。
- (3) 堤体前面各点の最大波圧は、傾斜面であったにもかかわらずほぼ同時に作用する。波圧の最大値をプロットした波圧分布形は合田式に低減係数 λ を乗じることで近似でき、実験値と計算値の相関から $\lambda=0.75$ を得た。
- (4) 底面各点に作用する揚圧力の時間変動は、前跡が最大となる時刻にやや遅れて後跡が最大となる。前跡が

最大となる時刻では底面圧力は合田式同様、後跡を0とした三角形分布となるが、その後、後跡圧力が増加し最大となり波圧分布は台形分布へと移行する。この現象は透過性防波堤の特徴といえる。

(5) 水平板作用波圧と堤体前面波圧には良好な相関があり、この相関係数を用いて各水平板の設計波圧算定式を導いた。

(6) 設計波圧式から算定した波力と三分力計による測定値の比較において、両者は良好に一致しており、設計波圧式の妥当性が確認された。

6. おわりに

透過性防波堤の開発を目ざした一連の2次元水理模型実験により、本防波堤の消波特性・波力特性が明らかとなり、また構造設計、安定性等の検討の際に必要となるデータも得ることができた。しかしながら、本防波堤を実際の海域に設置した場合の平面配置における消波効果、海水交換性能や堤体前面の底質移動機構などの評価を行うには2次元水理実験結果のみでは不十分である。今後はこれらの課題に対して3次元水理実験を実施し、検討を進めていくつもりである。

<参考文献>

- 1) 新田良典・山西博幸(1991)；多段水平板式透過性防波堤の消波特性、海洋開発論文集、Vol. 7, pp. 125～130.
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976)；不規則波実験における入・反射分離推定法、港湾技研資料, NO. 248, pp. 1～24.
- 3) 合田良実(1977)；港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp. 88～117
- 4) 谷本勝利・木村克利(1985)；台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技研資料, No. 528, PP. 1～28。