

通水路を有する透過性防波堤に関する研究

STUDY ON THE BREAKWATER WITH CHANNEL

森田修二¹・出口一郎²

Syuuji MORITA and Ichirou DEGUCHI

¹正会員 工博 (株)奥村組 電算センター (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²正会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Although breakwater provides a tranquil space in the region enclosed by the breakwater, circulation of sea water in the enclosed region is weakened and exchange of water becomes inactive. As a result, a deterioration of water quality becomes severe problem in some harbors. Submerged breakwaters and floating breakwaters may have sufficient function for exchanging water in the enclosed region but they are not effective to maintain tranquility.

In this study, the effect of channels of various shapes in the body of breakwater that permit water flowing between inside and outside of the breakwater is examined through experiments and numerical model using a source distribution method. It is found that slope-type channel and step-type channel is effective to reduce transmitted wave height when compared with a straight-type channel.

Key Words : Breakwater with channel, step-type channel, slope-type channel, source distribution method

1. まえがき

防波堤や離岸堤は静穏域の確保を目的とした構造物であるが、波を遮断するとともに海水の循環をも妨げ、水質の悪化が問題となることがある。海水の交換機能を有する透過性の防波堤には、浮体式や潜堤が考えられるが、波の遮蔽と海水の交換機能は相反する課題であり、これらの構造物によって波を十分に遮断するためには課題がある。一方、港湾などの水質悪化の原因には、船舶からの漏出油や人的なゴミ投棄などが考えられるが、汚濁の負荷量を考えれば、海水循環を促す適度な流れによって港内の水質維持は十分期待できる。本研究の目的は、従来の防波堤に特徴のある通水路を設けることで、効果的に波を遮断し海水の循環を促す透過性防波堤を提案することである。

2. 通水路の解析的検討

(1) 通水路付き防波堤の概要

防波堤に通水路を設けて海水交換機能を付加した

ものには、様々な形態の防波堤^{1) 2)}が提案されているが、多くは図-1に示すような水平型の通水路を有する防波堤となっている。しかし、通水路を設けた場合には、十分な波の遮蔽効果に問題が生じる。このため、通水路の断面形状を変えたり、通水路内で波のエネルギー逸散を図るなど波の遮蔽効果を向上させるための工夫がなされているが、海水循環をも阻害することが予想に難くない。一方、海の波は表面波であり、波の遮蔽効果を上げるためには通水路の水深 h_a を大きくすることが望ましい。

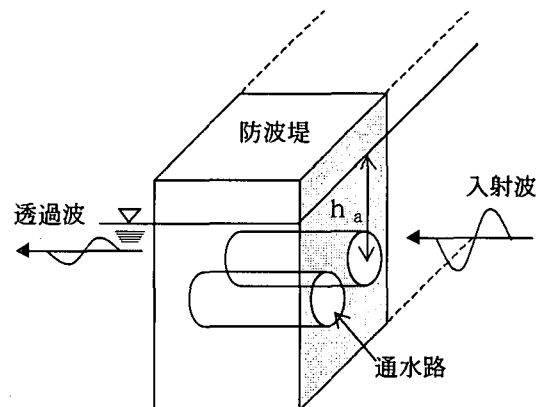


図-1 通水路を有する防波堤

しかし、通水路の水深を大きくすると、逆に海水循環が低下し、漂砂による埋没も危惧される。本研究では、波を効果的に遮蔽し海水循環を阻害しない通水路を有する防波堤として、図-2のステップ型通水路の防波堤およびスロープ型通水路の防波堤を考案した。これらの防波堤のメリットとしては以下のことが挙げられる。

- ①取水口（外洋側）が水面付近にあり、通水路の水深を大きくすることで生じる海水循環の阻害や漂砂による埋没がない。
- ②注水口（港内側）が海底付近にあり、波の遮蔽効果が向上する。

本報では、実験および解析によって提案する通水路を有する防波堤の波の遮蔽効果について検証を行った。また、このような防波堤の設計には、揚圧力の発生もあり通常の波力式では不十分である。本報では、防波堤の模型が受ける波力や波圧を測定し、湧き出し分布法を用いた波力の数値解析法の適用性を検証した。

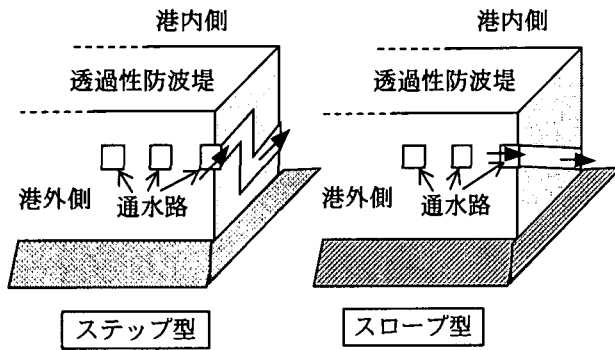


図-2 ステップ型とスロープ型の通水路を有する防波堤

(2) 解析手法

本報で考案したスロープ型やステップ型通水路を有する防波堤の特徴の中で、波の遮蔽効果について、湧き出し分布法を用いた2次元の積分方程式³⁾によって検討を行なう。図-3に示すような座標系で、一定水深における物体周りの定常の2次元微小振幅波の速度ポテンシャルについて、入射波の速度ポテンシャル Φ_I は(1)式で、湧き出し分布法を用いると、回折波の速度ポテンシャル Φ_D は(2)式で表される。

$$\Phi_I = R_e \left[-\frac{igH_1}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{i(kx-\omega t)} \right] \quad (1)$$

$$\Phi_D = R_e \left[\int_S f(p, q) G(x, z; p, q) dS(p, q) e^{-i\omega t} \right] \quad (2)$$

ここで、 H_1 は入射波の波高、 h は水深、 ω は角周波

数、 k は波数、 g は重力加速度、 f は湧き出し関数、 G はJohnのグリーン関数、 $\int_S dS(p, q)$ は物体表面の積分を表す。グリーン関数 G は進行波の成分 G_0 と減衰定常波の成分 G_n の和として(3)式で表される。

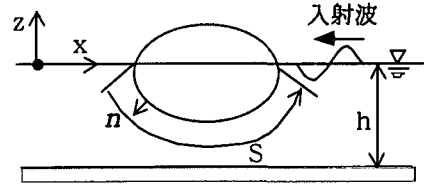


図-3 物体周りの座標系

$$G(x, z; p, q) = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n$$

$$= -\frac{iC_0}{k} \cosh k(h+z) \cosh k(h+q) e^{ik|x-p|}$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{k_n} \cos k_n(h+z) \cos k_n(h+q) e^{-ik_n|x-p|} \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{(k^2 - k_0^2)}{\{(k^2 - k_0^2)h + k_0\}} \quad (4)$$

$$C_n = \frac{(k_n^2 + k_0^2)}{\{(k_n^2 + k_0^2)h - k_0\}} \quad (5)$$

ここで、 k_0 は沖波の波数($=\omega^2/g$)、 k_n は減衰定常波の波数を表す。湧き出し分布関数 f は(2)式に水面や底面、無限遠方の境界条件を用いることなどで導かれる次式によって求められる。ここで、 ϕ_i は入射波の複素振幅、 $n=\{n_x, n_z\}$ は物体表面における単位法線ベクトルである。

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = -\int_S f(p, q) \left(\frac{\partial G}{\partial x} n_x - \frac{\partial G}{\partial z} n_z \right) dS(p, q) \quad (6)$$

通水路を有する防波堤に対して、湧き出し分布法による数値解析を行なう場合、通水路の大きさによっては、積分要素の要素間距離が短くなり、数値積分に大きな誤差が生じる。これはグリーン関数やその微分形に対数型あるいは逆数型の特異関数が含まれるためであるが、中村⁴⁾は特異点近傍では厳密積分を行なうことでこの問題を処理している。本報では、解析手法の煩雑化を避けるために、特異点近傍についてのみ積分要素を細分化することで数値誤差の縮小を図った。

(3) 透過率の算定

図-4には、通水路が水平な水平型の防波堤とステップ型、スロープ型の防波堤のモデルを示したが、

これらの防波堤について波の透過率を算定した。水深 $h=10\text{m}$ で一定とし、防波堤の幅 $B=5\text{m}$ 、通水路の高さは 2m とする。波の周期については、 $3\sim 20\text{秒}$ を検討の対象とした。また、スロープ型とステップ型の通水路の水深は入射側の水深を $h_b=3\text{m}$ 、透過側の水深を $h_c=7\text{m}$ で一定とするが、水平型は、通水路の水深を $h_a=3\text{m}, 5\text{m}, 7\text{m}$ の3ケースの解析を行なった。

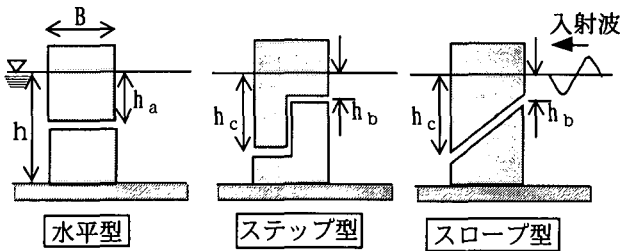


図-4 通水路を有する防波堤のモデル

図-5には透過率と反射率の解析結果を示した。白抜き印が水平型、黒塗りの●がステップ型、▲がスロープ型の結果である。水平型1は通水路の水深 $h_a=3\text{m}$ 、水平型2は水深 $h_a=5\text{m}$ 、水平型3は水深 $h_a=7\text{m}$ の結果である。水平型の結果を見ると、通水路の水深が大きいほど透過率が小さくなっており、水深に依存した速度ポテンシャルに対応した結果になっていることがわかる。

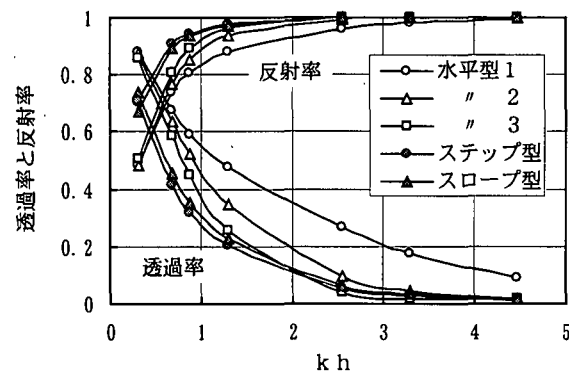


図-5 通水路付き防波堤の透過率と反射率

水平型とステップ型、スロープ型の結果を比較すると、ステップ型とスロープ型の透過率は水平型3と同等あるいはそれ以下の透過率になっており、反射率も水平型3と同等あるいはそれ以上になっていることがわかる。ステップ型とスロープ型の取水口の水深は水平型1と同じであるが、透過率や反射率は注水口の水深が水平型3と同等であり、効果的に波を遮蔽していると考えられる。また、長周期の領域では水深による速度ポテンシャルの差が小さくなるので、水平型では通水路の水深による差が小さく

なるが、ステップ型やスロープ型の透過率は比較的小さく抑えられている。逆に反射率は、水平型に比べて大きくなっており、これらの通水路の形状の効果が影響しているものと推測される。

図-6には、通水路内の中心線上における水粒子運動軌跡の鉛直振幅 ζ^* の変化で、 $kh=3.3$ における値を示した。振幅は入射波の水表面における振幅 ζ_0 で無次元化したものを示している。横軸は水平方向の座標であり、防波堤の中心を原点として港外側を正方向として表している。港外側から港内側に向かって、振幅が小さくなる状況は全てのケースで共通している。ステップ型の結果は、中央部で通水路が鉛直になっているので、 $X=0$ の位置で大きく変化している。水平型とステップ型、スロープ型を比較すると、ステップ型とスロープ型の振幅は水平型1とほぼ同様であり、通水路内の振幅は水深が小さいものと変わらないことがわかる。

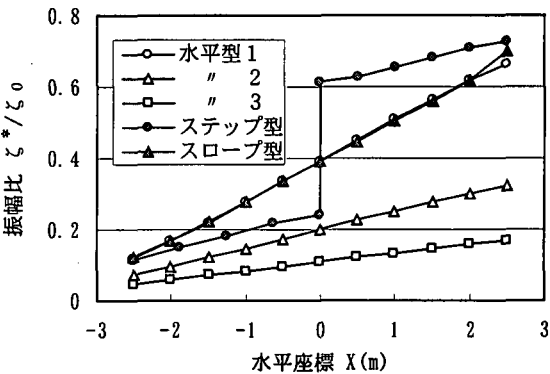


図-6 通水路内の水粒子振幅

また、図-7には透過側で防波堤から 0.5m 離れた位置での鉛直方向の振幅の変化を示した。ステップ型とスロープ型の結果を見ると、注水口付近の振幅は水平型1の注水口付近の振幅とほぼ一致するが、水面付近では水平型2や水平型3に近い。

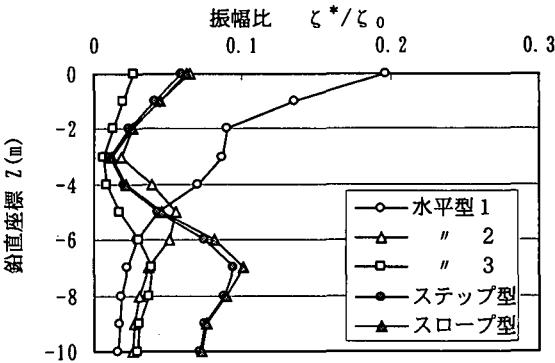


図-7 防波堤背面における水粒子振幅の鉛直分布

この結果は、ステップ型やスロープ型では注水口付近に港外から比較的大きな波が伝播しても、水面付近にまでは波が伝播しにくいことを示しており、これらの通水路が海水の循環を阻害しないことを示している。これらの結果と透過率・反射率の結果を合わせて考えると、ステップ型やスロープ型では、注水口の水深が大きいことで港内側の波高を抑える効果があることが推測される。

以上の結果から、波の透過率の面からは、単に平行水路の水深を大きくとるよりもステップ型やスロープ型の通水路が有利であると考えられる。

3. 実験の概要

(1) 実験の目的

本報で提案するステップ型とスロープ型通水路付き防波堤が、波の遮蔽効果において効果的であることは前項で解析的に示した。ここでは、この波の遮蔽効果を実験的に検証する。また、このような通水路を有する防波堤の設計には、防波堤前面での波圧分布のみを考慮した従来の波力式では、揚圧力の発生もあり不十分である。任意形状の構造物が受ける波力の算定手法の1つには湧き出し分布関数を用いた積分方程式法が考えられ、本報でもこの手法の適用を考えている。しかし、この手法では波の抗力やエネルギー逸散の評価に問題があるので、通水路を有する防波堤の波力の算定にどの程度有効であるか実験的に検討する。本実験の目的は、ステップ型、スロープ型防波堤の有効性と湧き出し分布関数を用いた積分方程式の適用性を検証することである。

(2) 実験装置

実験では、ステップ型通水路とスロープ型通水路に加え、比較のために一般的な水平通水路を有する防波堤の模型を用いて実験を行う。図-8には、実験に用いる通水路付き防波堤のスロープ型の模型を示した。波力を直接測定する部分と波の遮蔽を目的とした補完部分によって構成されているが、ステップ型通水路や水平通水路の模型も同様の形で、中央の部分のみ通水路の形状を変えたものを用いた。水平通水路の模型は、通水路の水深を3種類変えることができるように製作し、ステップ型やスロープ型の取水口、注水口の水深と同一のものと中間の水深の3種類を用意した。なお、模型のスケールについては、現地の1/10～1/20を想定して設定した。

図-9には実験に用いた2次元水槽を示したが、水槽の中央付近に模型を設置している。水槽の中央付近に模型が受ける水平波力を測定するために、水槽の床下に波力測定台を設置している。波力測定台は

4本の板バネで支承された可動台に防波堤の模型を固定し、模型が受ける水平波力を板バネのひずみから計測する仕組みとした。⁵⁾

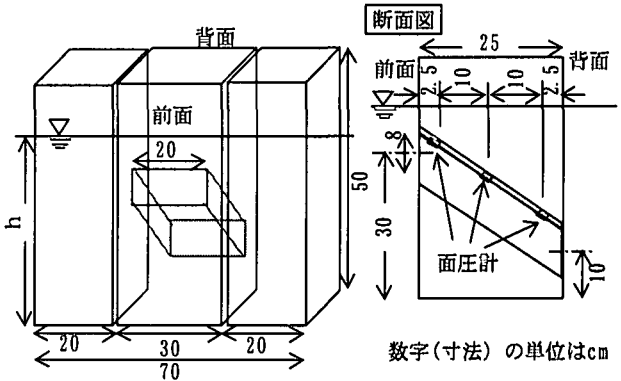


図-8 防波堤の模型（スロープ型）

(3) 測定項目

実験における測定項目は以下の通りである。なお、②波圧、③透過波の波高、を測定するには、模型の振動による発散波を除くために波力測定台を固定して測定を行なった。

①水平波力

波力測定台に設置した模型が受ける水平波力。

②波圧

模型の通水路内に設置した面圧計によって測定。面圧計の位置は、図-6の断面図に示した通りであるが、奥行き方向には中心面上に設置した。

③透過波の波高

透過波の波高を容量式波高計によって測定。なお、入射波の波高については、反射波の除去が難しいため、模型を設置する前に周期や造波板の振幅に応じた入射波高を測定。

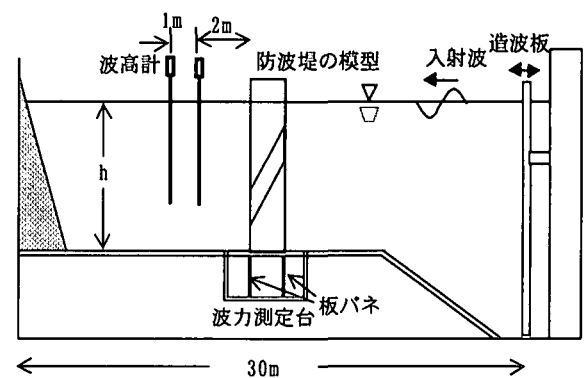


図-9 実験水槽の概要

(4) 実験の水理条件

実験の水理条件を次表のように設定した。防波堤の模型は現地の1/10～1/20のスケールを想定してい

るが、波の周期については、造波機の制約からやや長めの設定となっている。

表-1 実験の水理条件

実験番号	波の周期 (秒)	水深	波高
①	1.0	40cmで一定	約3cm～6cm で、周期ごと に大小の 2ケース
②	1.1		
③	1.2		
④	1.3		
⑤	1.4		
⑥	1.5		

4. 実験結果

(1) 透過波の波高

図-10に水平型の透過率、図-11にステップ型とスロープ型の透過率の結果を示した。○印がステップ型、△印がスロープ型の結果である。水平型では水平型1 ($h_a=10\text{cm}$) を●印、水平型2 ($h_a=20\text{cm}$) を▲印、水平型3 ($h_a=30\text{cm}$) を■印で表示している。縦軸は波の透過率、横軸は波数 k と水深 h の積である。

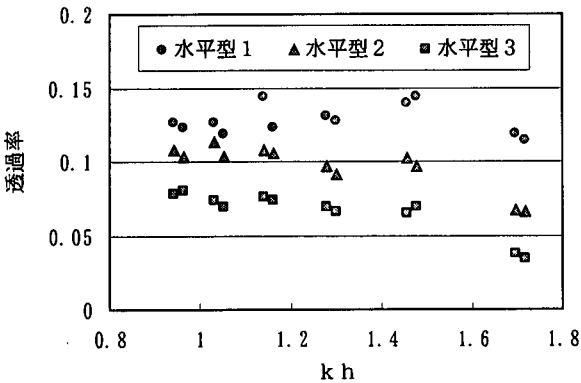


図-10 水平型の透過率

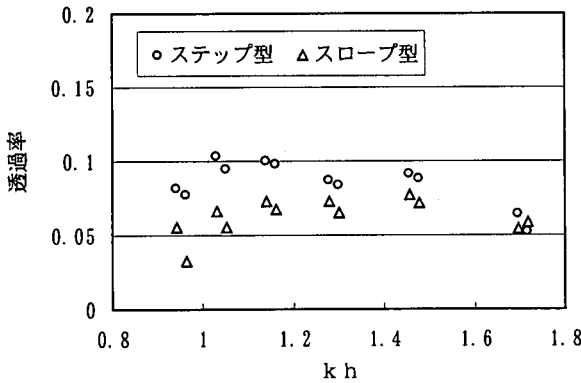


図-11 ステップ型とスロープ型の透過率

水平型の結果を見ると、通水路の水深が大きいほど透過率が小さくなっており、解析で事前に検討した結果を実証する内容となっている。また、スロープ型の透過率は水平型3の結果と同等であり、水平型1の透過率の半分程度になっている。ステップ型の透過率はやや大きい、水平型2もしくは水平型3と同等の結果であることがわかる。これらの結果も事前に解析で示した内容を実証するものであり、ステップ型とスロープ型の通水路が波の遮蔽効果の面では有効であることを示している。

(2) 波圧

図-12に水平型、ステップ型、スロープ型の波圧を示した。○、△、□が実験結果、実線、点線、一点鎖線が解析結果で、 p_1 、 p_2 、 p_3 の順に注水口（透過側）からの面圧計の位置における波圧を表している。面圧計は図-8の防波堤模型の断面図にあるように通水路の天端に各タイプともに水平座標を一致させるように3個設置した。ただし、ステップ型の中央の面圧計は、水深15cmの取水口側の壁に設置した。縦軸は波圧の振幅を水の密度 ρ 、重力加速度 g 、入射波の波高 H で無次元化した値である。

各結果ともに取水口（入射側）～注水口（透過側）の順に波圧が大きく、周期が長いほど波圧が大きい。

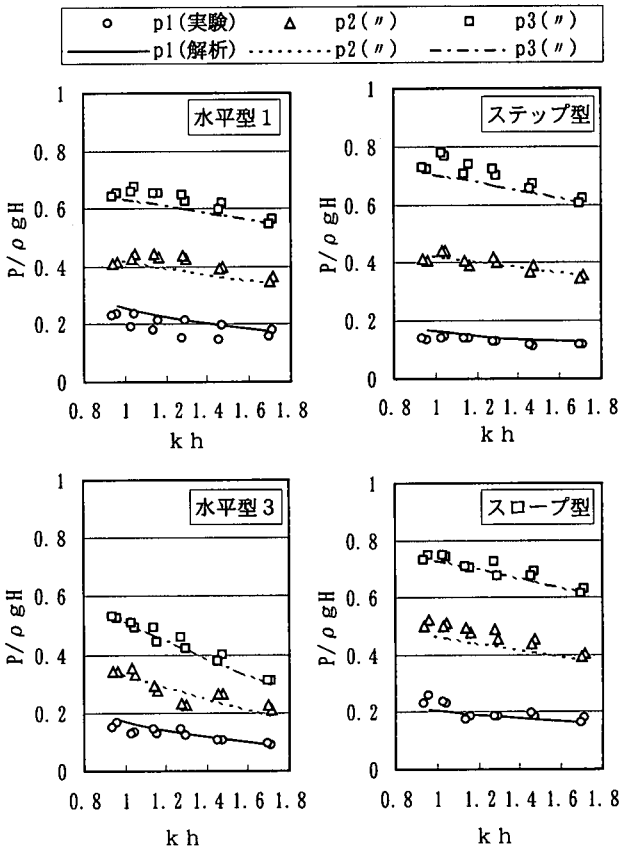


図-12 波圧の変化

この周期の影響については通水路の水深が大きいほど顕著である。入射側の波圧が大きいことは容易に理解できるが、周期の影響は、周期が短いほど水深増加による波動の減衰が大きくなることが原因で、水深が大きいほど顕著になると考えられる。

また、ステップ型とスロープ型の結果と水平型を比較すると、 $p1$ は水平型1の $p1$ に、 $p2$ は水平型2の $p2$ に、 $p3$ は水平型3の $p3$ に対応しており、概ね面圧計の位置（水深と水平座標）に依存していることがわかる。さらに詳細に見れば、 $p1$ の値は水平型1の $p1$ よりもやや波圧が大きく、反射波の影響が含まれていると推測できる。以上の結果を踏まえると、ステップ型とスロープ型の波の透過は、入射側から透過側に向かって、水平型1から水平型3の状況に移行していることを示しており、波圧の結果からもステップ型とスロープ型の波の遮蔽効果は水平型3と同等であると考えられる。

(3) 波力

図-13に水平型の受ける水平波力、図-14にステップ型とスロープ型の水平波力を示した。縦軸は波力の振幅を $\rho g H$ と模型の幅 D で無次元化した値である。 $F1$ が水平型1、 $F2$ が水平型2、 $F3$ が水平型3の結果である。解析では波力の大きさは $F3$ 、 $F2$ 、 $F1$ の

順になっているが、その差は僅かなものである。実験結果では、 $F3$ が最も大きいようであるが、その差は明確にはなっていない。通水路の水深が大きいほど波の透過率が小さくなり、波力が大きくなると考えられるが、波長に比べて水深が小さいために、実験では波力の差が明確になっていない。一方、周期による変化を見ると、実験と解析ともに周期が短いほど波力が小さくなる傾向はよく一致している。この傾向は、波圧と同様に、周期が短いほど水深増加による波動の減衰が大きくなることが原因である。

ステップ型とスロープ型の波力の結果を見ると、解析ではスロープ型の方が波力が大きくなっており、実験結果でもその傾向はうかがえる。透過率の結果においてスロープ型の方が透過率が小さく、波力が大きくなることと一致する。

以上の波圧と波力の実験と解析の比較から、通水路を有する防波堤の解析に湧き出し分布法が適用できると考えられる。

5. 結論

本報では、透過性防波堤として従来の防波堤に特徴のある通水路を設けることを試みた。その結果、単に水平型の通水路を設けるよりもステップ型やスロープ型の通水路が波の遮蔽効果からは有利であること、通水路内の海水循環を阻害しないことが、解析と実験によって実証できた。また、このような通水路を有する防波堤の波力に対する安定性を検討する上で、従来の波力式では不十分と考えられるが、波圧と水平波力の検討結果から、湧き出し分布法が適用可能であることも検証できた。今後は、海水の交換性能や通水路の間隔を考慮した透過率の算定手法について研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 森口朗彦ほか：潜堤付孔空き防波堤の実海域での導水特性と泊地内水環境予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.886～890, 1992.
 - 2) 小田一紀ほか：波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.1116～1120, 1995.
 - 3) 中村孝幸ほか：わき出し分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.462～466, 1982.
 - 4) 中村孝幸：薄肉物体まわりの波浪境界値問題に関する解析法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.410～414, 1983.
- 久保田ほか：板部材で構成された底設構造物に作用する流体力に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.801～805, 1997

(1999. 4. 19受付)

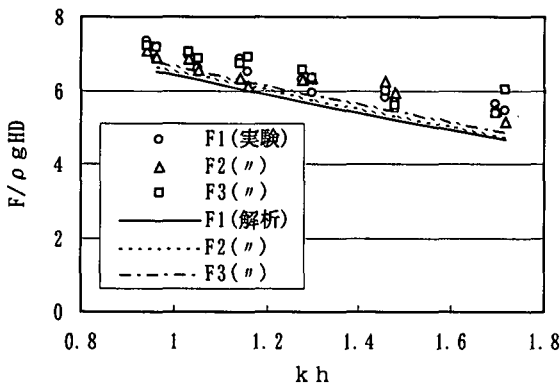


図-13 水平型の波力

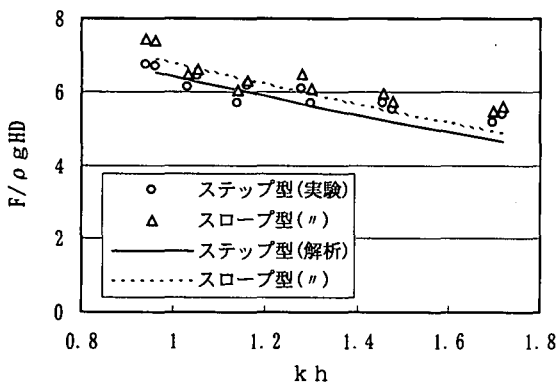


図-14 ステップ型とスロープ型の波力