

## 急勾配斜面に設置した遊水部付き消波工を 有する堤体の機能性・耐波安定性に関する研究

大村智宏<sup>\*1</sup>・新井雅之<sup>\*2</sup>・中山哲巖<sup>\*2</sup>

### Study on wave control function and stability on vertical structure with a detached mound made of wave-dissipating concrete blocks for steep bottom slope

Yoshihiro OHMURA<sup>\*1</sup>, Masayuki ARAI<sup>\*2</sup> and Akiyoshi NAKAYAMA<sup>\*2</sup>

**Abstract** In Japan, not only breakwaters but also seawalls inside surf zone are normally covered with wave-dissipating concrete blocks in front of the vertical wall. The placement of wave-dissipating concrete blocks is helpful to reduce wave overtopping, transmitted waves and wave pressure acting on the wall. The vertical structure with a detached mound made of wave-dissipating concrete blocks (hereinafter referred to as “the detached type”) is a kind of structure. It is basically pointed out that the detached type is more effective than the conventional type in both wave control function and stability. But the values of wave overtopping rate, wave transmission coefficient and time-averaged water elevations in wave chamber on the detached type may not be estimated quantitatively. Moreover the wave pressure acting on the wall is not proved for steep bottom slope. Therefore, we have carried out the experiment to examine the performance of the detached type using 2 models for bottom slope of 1/10 in a long wave flume. The volume of fluid method is employed in numerical simulation. As a result of both physical model test and numerical simulation, the values of wave overtopping rate, wave transmission coefficient and time-averaged water elevations are confirmed for slope of 1/10. It is also found out that the wave pressure acting on the wall shows impulsive wave pressure at around still water level.

**Key words:** detached type, wave overtopping, transmitted wave, wave pressure, physical model test, numerical simulation

漁港では、荒天時における波浪や風などの外力に対して、利用対象船が安全に係留できるように泊地の静穏性を確保するとともに、漁港施設用地の利用に支障が生じることのないように、各種施設を適切に配置することがもとめられる。その際、漁港の利用対象船が小型漁船であることが多く、かつ漁業活動に不可欠な機能施設が水際線に近接、集積していることから、防波施設には高い波浪制御機能が備わっていることが必要である。また、漁港に近接する漁港海岸では、海岸

背後に漁村集落などが存在することから、荒天時に越波量が許容範囲内となるように、消波施設を適切に配置することが不可欠である。

これら防波・消波施設の構造体としては、機能性および耐波安定性の双方を勘案して、波のエネルギーを積極的に逸散する消波ブロックがこれまで多く用いられてきた。消波ブロックを用いた代表的な構造体としては、直立堤の前面壁を消波ブロックで被覆する消波ブロック被覆堤のほか、消波ブロック式の傾斜堤、潜

堤が知られている。直立堤と離岸式傾斜堤を組み合わせた構造もあり、遊水部付き消波工を有する堤体（防波堤・護岸）とよばれている。ここでは、遊水部付き消波工を有する堤体を取りあげることとする。

遊水部付き消波工を有する堤体は、既設の消波ブロック被覆堤の波浪制御効果をさらに向上させる際に有効である。端趾圧や景観といった制約をうけて、既設の直立堤の天端を嵩上げできない場合には、直立堤を被覆していた消波ブロックを離岸式傾斜堤部分に移設することにより、越波や伝達波の制御機能の向上をはかることができる。また、新規に防波・消波施設を整備する場合には、消波ブロック式傾斜堤を直立堤に先行して施工することができるため、消波ブロック被覆堤よりも施工性に優れるといえる。

一般的に、波浪制御構造体の機能は、防波堤としての性能を伝達波高で評価して、護岸としての性能を越波量で評価している。遊水部付き消波工を有する堤体は、もっぱら越波量に着目した実験的研究がおこなわれてきた（榎木ら，1975；合田，岸良，1976；佐伯ら，1980；西，山本，1981；影山，山本，1981；西，山本，1982；中山ら，1986；間辺，山本，1988；笹島ら，1993；山本ら，1997）。たとえば，中山ら（1986）は斜面勾配1/10，1/30，遊水部の長さを入射波長の0.1倍程度，消波工の天端ブロック2個並び，法勾配1:1.3として不規則波実験をおこない，遊水部付き消波工を有する護岸は消波工付護岸と比較して，1/10勾配で0.07～0.4倍，1/30勾配で0.1～0.5倍に越波流量が低減されること，同一の許容越波流量に対して，遊水部付き消波工を有する護岸の直立堤天端高は，消波工付護岸の直立堤天端高の0.5～0.9倍に低減できることを明らかにしている。このように，遊水部付き消波工を有する護岸は，規則波のみならず不規則波に対しても消波工付護岸と比較して越波流量の低減効果が大きいことがわかっているものの，既往の実験的研究では構造諸元が限られたものとなっており，必要に応じて実験することがもとめられる。

一方，遊水部付き消波工を有する堤体の直立壁に作用する波圧・波力については，佐伯ら（1980），影山，山本（1981）が規則波実験をおこなっているほか，中泉，山本（1989），山本ら（1996）が不規則波実験をおこなっている。このうち，中泉，山本（1989）は，1/30勾配斜面，遊水部の長さを入射波長の0.1倍程度，消波工の天端ブロック3個並び，法勾配1:1.3としておこなった実験結果から，遊水部付き消波工を有する堤体の直立壁に作用する波力が消波ブロック被覆堤の直

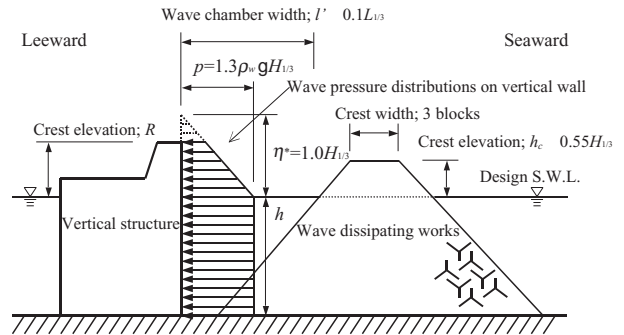


Fig. 1 遊水部付き消波工を有する堤体の標準断面および直立堤前面壁に作用する波圧分布

立壁に作用する波力（森平ら（1967）の波圧式を仮定）と比較して同程度あるいは小さくなる場合の波圧の設計式を提案している。この波圧式は，「漁港・漁場の施設の設計の手引2003年版，（水産庁監修，2003）」（以下，「手引」という）において採用されており，1/30勾配よりも緩い勾配斜面に対して適用してよいとされている（Fig. 1）。しかしながら，1/30勾配よりも急な勾配斜面における波圧・波力特性はわかっておらず，必要に応じて水理模型実験を実施しなければならない。

そこで本研究では，遊水部付き消波工を有する堤体を1/10勾配斜面かつ大水深に設置した場合の波浪制御機能および耐波安定性の把握を目的として，長水路での水理模型実験と自由水面を有する非圧縮性粘性流体を対象とした数値計算をあわせて実施して検討をおこなったので報告する。

## 水理模型実験の方法

### 実験施設

水理模型実験は，Fig. 2 に示す独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の漁港水理実験棟潮流風洞付造波水路（長さ100.0m，幅1.0m，高さ1.5m）でおこなった。この長水路の一端には反射波吸収制御式ピストン型造波装置が，他端には再反射波を防ぐための砕石およびヘチマロンよりなる5.0m分の消波材が設置されている。1/10勾配斜面は，水平距離8.0mの区間で水路床から0.80mの高さまで一様勾配となるように，それに続く水平床は8.0mとしている。この1/10勾配斜面と水平床は，長さ200cm，幅100cm，厚さ2.0cmの鉄板を用いて製作し，水路壁との隙間をシリコンシーラントで埋めた。

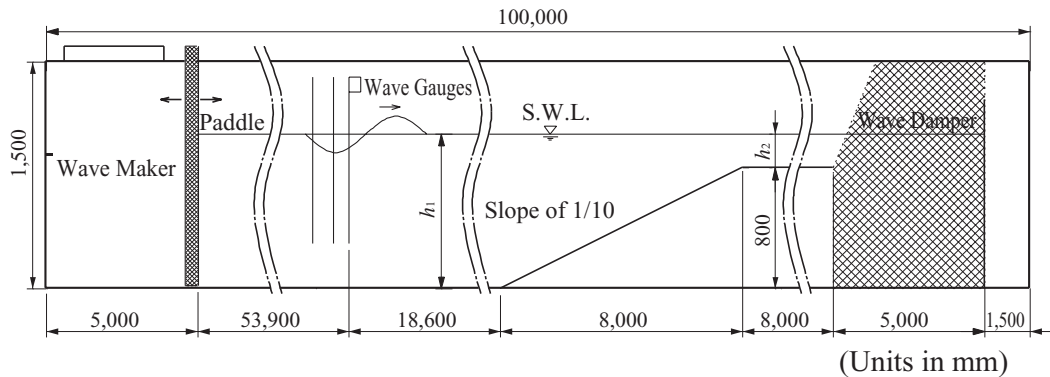


Fig. 2 . 水理模型実験で用いた長水路の諸元

**堤体模型の構造諸元**

遊水部付き消波工を有する堤体には、Fig. 3 に示す 2 タイプの構造模型CASE1, CASE2を用いた。直立堤はABS樹脂およびアクリル板で製作し、離岸式消波工はおよそ640gの質量のテトラポッド(コンクリート製)を乱積して製作した。消波工の天端高 $h_c$ 、天端幅 $B$ 、遊水部幅(直立堤から消波工までの離岸距離) $l$ などの構造諸元は、作用波浪および「手引」をもとにして決定したものである。

このうち、CASE1は消波工の天端高 $h_c$ と直立堤の天端高 $R$ との比が $h_c/R = 0.556$ であり、「手引」において海底勾配1/30より緩勾配斜面で耐波設計上、要求される構造諸元としている。遊水部幅 $l$ についても、構造物設置位置での波長 $L$ に対して $l = 0.1L$ 程度であり、「手引」で要求される距離を設定した。直立堤の設置水深 $h_b$ は $h_b = 22.3\text{cm}$ である。伝達波高の実験においては、直立堤のパラペットおよび堤体幅を拡幅した。

一方、CASE2は消波工の天端高と直立堤の天端高との比が $h_c/R = 0.905$ であり、越波流量および直立壁への作用波圧の低減効果がCASE1と比較して、より高いことを期待して設定した構造体である。遊水部幅は、同じく構造物設置位置での波長に対して $l = 0.1L$ 程度としている。直立堤の設置水深は $h_b = 20.5\text{cm}$ である。

なお、ここで想定した模型の縮尺は、ともに1/20 ~ 1/40程度である。

**作用波浪**

実験では、規則波およびBretschneider・光易型スペクトルの不規則波を用いた。作用波の諸元はTable 1 に示すとおりであり、水路床での造波水深 $h$ はCASE1で $h = 102.3\text{cm}$ (波圧実験では $h = 101.0\text{cm}$ も併せて実施)、CASE2で $h = 100.5\text{cm}$ として、規則波4波種、不規則波3波種を基本波として設定した。これらの作用

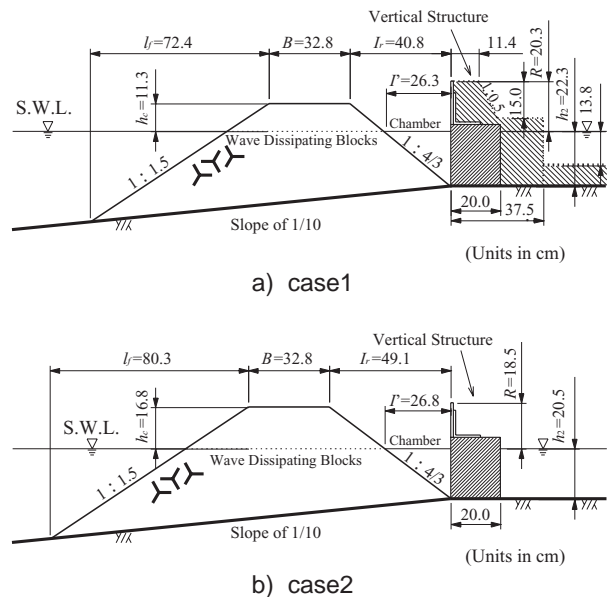


Fig. 3 . 遊水部付き消波工を有する堤体模型の構造諸元

波について、造波後、現象が安定した後の水位変動に対してゼロアップクロス法を適用し、個々の波の波高、周期を定義した(合田, 1968; 高山, 神山, 1976; 合田, 1990)。不規則波では最高波, 1/10最大波, 有義波に、規則波では算術平均波に整理するとともに、FFT法による入・反射波の分離(合田ら, 1976)をおこない進行波の波高を算出した。また、換算沖波波高 $H_b'$ は、造波波高(不規則波では有義波高)を計測した位置での浅水係数 $K_s$ で除して算定している。その際、浅海アーセル数 $U_s (= gHT^2/h^2)$ が30未満であったことから、微小振幅波理論から算定される浅水係数を用いた(首藤, 1974; 水理公式集, 1999)。

## 実験項目および計測方法

以下に述べる4項目の実験をおこなった。

### 進行波実験

Fig. 4 に示すように、遊水部付き消波工を有する堤体を設置しない場合の造波波浪の特性および一様勾配斜面上の波浪変形を把握するため、容量式波高計（検出部：KENEK, CHT6-40, CHT6-60, CHT6-100, 本体部：KENEK, CH-604, CH-608）を用いて水位変動を計測した。造波波浪の確認用として水路床の1地点（入反射波分離用に2本の波高計を配置）と1/10勾配斜面肩から沖側まで6m区間の斜面上8地点にそれぞれ波高計を配置した。データは、造波して現象が安定した後、規則波でおよそ10波分、不規則波でおよそ200波分をサンプリングタイム20msでAD変換して収集した。

Table 1 . 作用波の諸元

	目標波高(cm)	目標周期(s)	造波水深(cm)	浅水係数
不規則波	16.0	1.79	100.5	0.918
			102.3	0.919
	14.9	1.90	100.5	0.914
			102.3	0.915
	16.0	2.06	100.5	0.913
			102.3	0.913
規則波	16.1	1.79	100.5	0.919
			102.3	0.918
	20.0	1.79	100.5	0.919
			102.3	0.918
	23.9	1.79	100.5	0.919
			102.3	0.918
	28.0	1.79	100.5	0.919
			102.3	0.918

### 越波量実験

Fig. 5 に示すように、構造模型CASE1, CASE2のそれぞれについて、作用波と直立堤上の越波量を計測した。越波量は、幅1.0mの水路に設置した直立堤前面壁の中央部50cm幅を越波した水を集水升に集めて、これを荷重計（検出部：東京計測, S645, 定格容量0.98kN, 100kgf, アンプ：共和電業, MCC-16A, DPM-11A, 応答周波数2.5kHz, 最大測定範囲 $\pm 5000 \times 10^{-6}$ ひずみ）により計測した。水位変動は、容量式波高計を用いて測定した。これらのデータは、造波して現象が安定した後、規則波でおよそ10波分、不規則波でおよそ200波分をサンプリングタイム20msでAD変換して収集した。

### 伝達波実験

Fig. 6 に示すように、構造模型CASE1のパラペットおよび堤体を拡幅して、作用波と伝達波を測定した。造波波浪の確認用として水路床の1地点（入反射波分離用に2本の波高計を配置）と直立堤の背後壁から62.5cm, 162.5cm, 362.5cmの3地点に容量式波高計を配置して、水位変動を測定した。データは、造波して現象が安定した後、規則波でおよそ10波分、不規則波でおよそ200波分をサンプリングタイム20msでAD変換して収集した。

### 波圧実験

Fig. 7 に示すように、構造模型CASE1, CASE2のそれぞれについて、直立堤の前面壁中心線上の7箇所に波圧計（検出部：三計エンジニアリング, P310-02, 定格容量19.6kPa, 200gf/cm<sup>2</sup>, アンプ：共和電業, MCC-16A, DPM-11A, 応答周波数2.5kHz, 最大測定範囲 $\pm 5000 \times 10^{-6}$ ひずみ）を取り付けて、壁に作用する波圧を計測した。データは、造波して現象が安定した後、規則波でおよそ10波分、不規則波でおよそ200

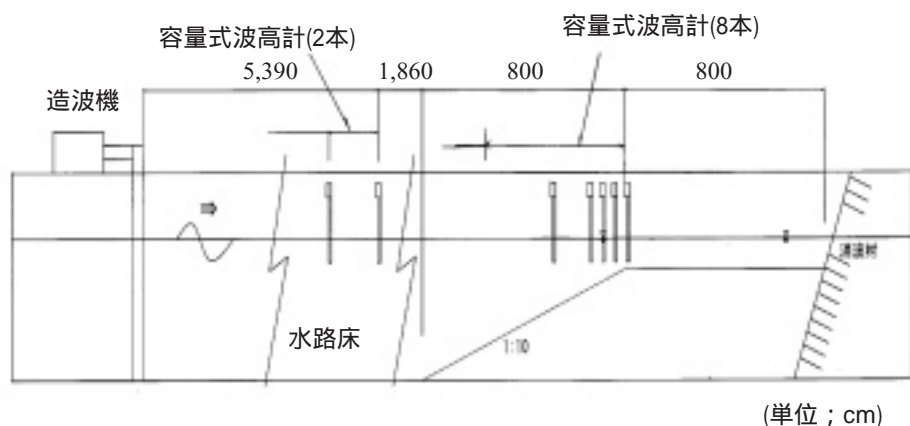


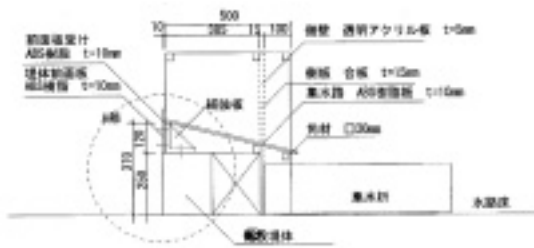
Fig. 4 . 進行波実験の計測方法模式図



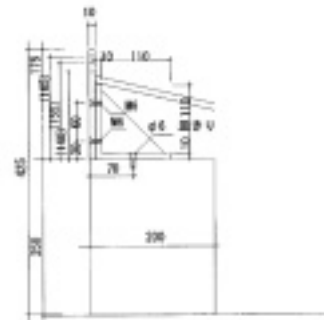
波分をサンプリングタイム200  $\mu$ sでAD変換して収集した。そして、波圧合力にLow Pass Filterをかけて、その波圧合力のゼロアップクロス点間の最大値を1波力と定義するとともに、波圧合力のゼロアップクロス点間において発生する各波圧の最大値を1波圧として定義した。波圧は、最高波圧、1/10最大波圧、1/3最大

波圧に整理した。さらに、同時刻に発生する各計測点の圧力から波力を求め、最高波力、1/10最大波力、1/3最大波力として整理した。また、水位変動は、容量式波高計を用いて、波圧の計測時間と同時間のデータをサンプリングタイム20msでAD変換して収集した。

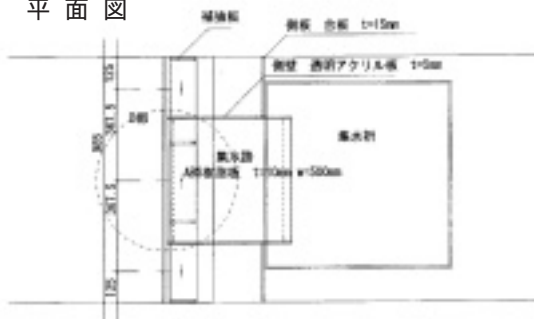
断面図



A部



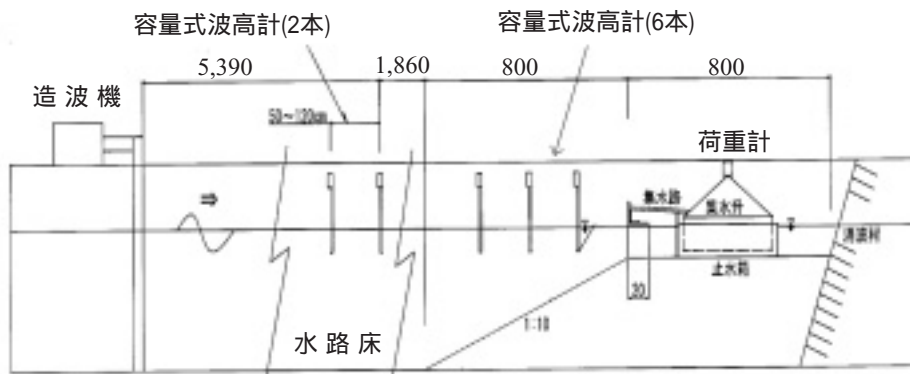
平面図



B部



(単位 ; mm)



(単位 ; cm)

Fig. 5 . 越波量実験の計測方法模式図

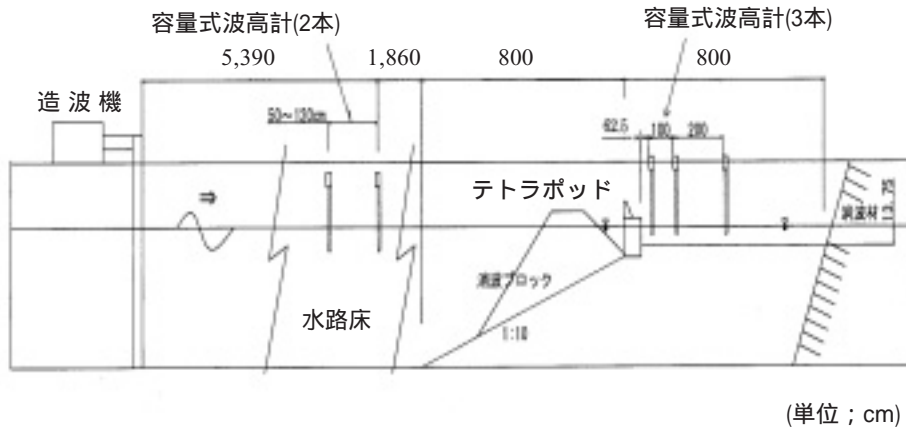


Fig. 6 . 伝達波実験の計測方法模式図

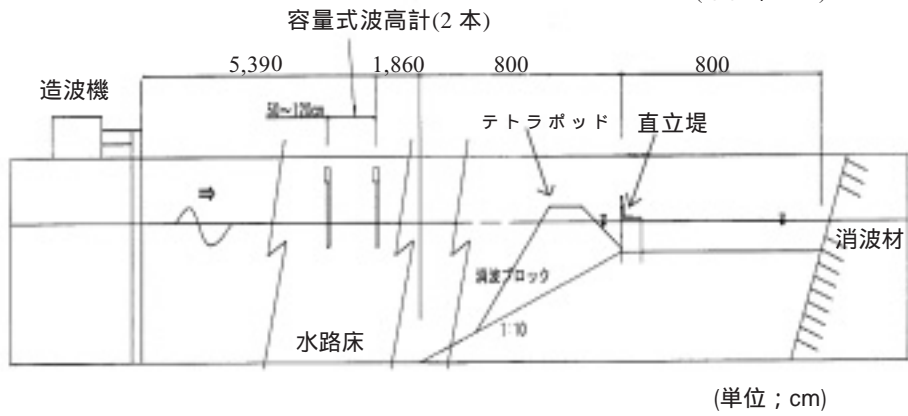
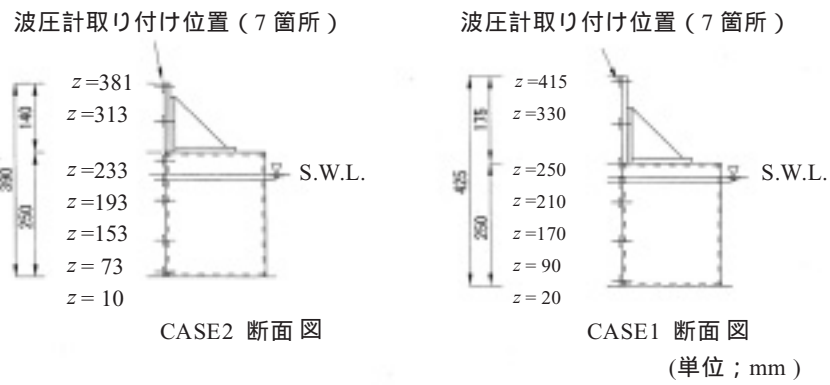


Fig. 7 . 波圧実験の計測方法模式図

## 数値計算の方法

### VOF法

自由水面を有する非圧縮性粘性流体の流体現象を解析的に取り扱う方法のひとつにVOF法 (Volume of Fluid Method) がある。VOF法はもともとHirtらの研究グループによって研究・開発された手法であり、波動などの流体運動の解析において有力な手法として知られている (Nichols *et al.*, 1980 ; Torrey *et al.*, 1985)。また、ソースプログラムが公開されていることもあり、CFDの分野では粒子法などとならんでさまざまな流体現象の解析において広く用いられてきた。このVOF法の発展系としてCADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure) Ver. 4.0 (沿岸開発技術研究センター, 2001) がある。CADMAS-SURFの特長としては、基礎方程式にポーラスボディモデル (榊山ら, 1990) が組み込まれており、消波ブロックや捨石などの透過性構造物を取り扱うことができるという点があげられる。さらに、数値波動水路で無反射造波境界を実現しており、複雑な波動現象の解析に優れていることを著者らも検証している (大村ら, 2003 ; 中村ら, 2003 ; Ohmura *et al.*, 2005)。本研究では、このCADMAS-SURFを用いて、遊水部付き消波工を有する堤体の越波現象を検討することとした。

### CADMAS-SURFの方程式系および解法

CADMAS-SURFでは、2次元非圧縮性粘性流体に対するNavier-Stokesの方程式にポーラスボディ (多孔質体) モデルを用いたものを基礎方程式 (式(1)~(3)) として採用している。これらの基礎方程式は、スタッガードメッシュ系としてコントロールボリューム法により空間的に離散化されて、SMAC法 (Simplified Marker and Cell method) (Amsden and Harlow, 1970) による時間発展型として計算される。その際、内部の流体として計算することができない自由表面については、式(4)に示すVOF関数 $F$ の移流方程式にDonor-Acceptor法を適用して取り扱われる。

### 連続方程式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = q_s(z, t) \quad (1)$$

### 運動方程式

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} - D_x u + u q_s(z, t) - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + w q_s(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q_s(z, t)}{\partial z} - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

### VOF関数 $F$ の移流方程式

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = F q_s(z, t) \quad (4)$$

ここで、 $t$ : 時間、 $x, z$ : それぞれ水平方向、鉛直方向の座標、 $u, w$ : それぞれ水平方向、鉛直方向の流速、 $\rho$ : 水の密度、 $p$ : 圧力、 $v_e$ : 分子動粘性係数および渦動粘性係数の和、 $g$ : 重力加速度、 $\gamma$ : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_z$ : それぞれ水平方向、鉛直方向の面積透過率、 $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ : それぞれ構造物の存在による慣性力、 $D_x, D_z$ : それぞれ水平方向、鉛直方向のエネルギー減衰帯における係数、 $q_s(z, t)$ : 造波ソース、 $R_x, R_z$ : それぞれ水平方向、鉛直方向のポーラスボディからの抵抗力である。

これら基礎方程式中にある構造物の存在による慣性力およびポーラスボディからの抵抗力については、それぞれ式(5)、(6)に示すようにモデル化されている。また、エネルギー減衰帯 (式(7)) (Eric Cruzら, 1993) およびSommerfeldの放射条件 (式(8)) を組み合わせることにより、式(9)に示す造波ソースを任意の位置に設定することができる。

### 構造物の存在による慣性力

$$\left. \begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

### ポーラスボディからの抵抗力

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

エネルギー減衰帯における係数

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \\ D_z &= \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Sommerfeldの放射条件

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

造波ソース

$$q_s(z,t) = \frac{2U_s(z,t)}{\Delta x_s} \quad (9)$$

ここで、 $C_M$ ：慣性力係数、 $C_D$ ：抗力係数、 $\Delta x$ 、 $\Delta z$ ：それぞれ水平方向、鉛直方向の格子間隔、 $h$ ：水深、 $l$ ：エネルギー減衰帯の長さ（ $=2L$ ）、 $x_0$ ：エネルギー減衰帯の開始位置、 $N$ ：分布関数の次数（ $N=2$ ）、 $\theta_x$ 、 $\theta_z$ ：無次元係数（ $\theta_x=0.6$ 、 $\theta_z=0.6$ ）、 $f$ ：物理量、 $C$ ：波速、 $\Delta x_s$ ：造波ソースでの格子間隔、 $U_s(z,t)$ ：造波用流速（ストークス波第5次近似解あるいはクノイド波第3次近似解）である。

計算条件

Fig. 8 に数値計算で用いた水路および構造体の設置位置を示す。これは、水路長を除いて、水理模型実験で用いた地形および堤体模型と同じとなるように設定したものである。作用波は規則波であり、水理模型実験結果と比較・検討するため、造波波高  $H_i = 15.0 \sim 30.0\text{cm}$ 、周期  $T = 1.79\text{s}$  とした。計算条件は、榊山、今井（1996）、榊山、香山（1997）の研究成果を踏まえ

てTable 2 に示すとおりに設定した。

直立堤の越波流量  $q(t)$  は、式(10)に示すように直立堤の前面壁上（ $x = x_1$ 、 $z_1 \leq z \leq z_2$ ）の水平方向流速にVOF関数を乗じて算定した。

$$q(t) = \int_{z_1}^{z_2} u(x_1, z, t) F(x_1, z, t) dz \quad (10)$$

Table 2 . VOF法の計算条件

計算領域	長さ( $x$ )3,000cm, 高さ( $z$ )150cm
計算格子	$x = 0 \sim 1,960\text{cm}$ , $\Delta x = 4.0\text{cm}$ $x = 1,960 \sim 2,000\text{cm}$ , $\Delta x$ を暫減： 隣り合う格子間隔の比1.0~0.9倍 $x = 2,000 \sim 3,000\text{cm}$ , $\Delta x = 1.0\text{cm}$ $z = 0 \sim 150\text{cm}$ , $\Delta z = 1.0\text{cm}$
造波ソース	$x = 1,352\text{cm}$
境界条件	$x = 0.0\text{cm}$ , Sommerfeldの放射条件 2波長分のエネルギー減衰帯 $x = 3,000\text{cm}$ , Sommerfeldの放射条件
底面地形	$x = 0 \sim 2,000\text{cm}$ , $z = 0\text{cm}$ $x = 2,000 \sim 2,800\text{cm}$ , 1/10勾配斜面 $x = 2,800 \sim 3,000\text{cm}$ , $z = 80\text{cm}$
堤体設置位置	$x = 2,800\text{cm}$ ; 直立堤前面壁
移流項の差分法	DONOR-0.1 (中心差分と風上差分の割合, 9:1)
VOF関数 $F$	フリー
その他境界・諸量	スリップ条件
ポアラス値下限値	0.0001
気泡上昇速度	0.2m/s
水滴落下速度	フリー
消波工	空隙率 $V_i = 0.5$ , 慣性力係数 $C_M = 1.2$ 抗力係数 $C_D = 1.0$
造波時間	静水状態から30s間
時間刻みの安全率	0.25 (CFL条件および粘性項の安定条件から決まる時間刻み幅に掛ける安全率)
サンプリングタイム	$T/100$

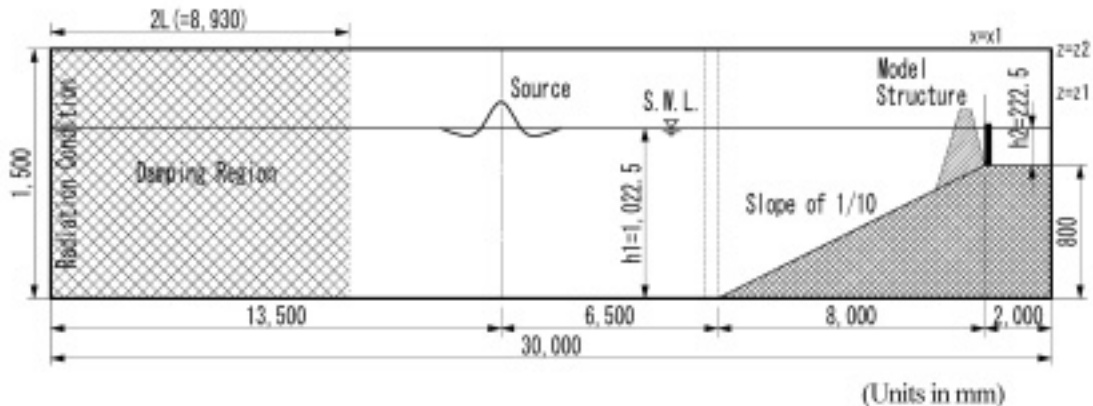


Fig. 8 . 数値計算で用いた水路諸元および堤体の配置位置



結果および考察

進行波実験

不規則波のスペクトル形状

Fig. 9 に沖側の水路床で計測した不規則波の入射波スペクトルをBretschneider・光易型スペクトルとあわせて示す。計測した入射波スペクトルは、Bretschneider・光易型スペクトルと比較して高周波数側においてエネルギーがカットされている。これはFFT法による

入・反射波の分離を用いていることから、分離推定の際の有効範囲外となるスペクトルがカットされているためである。図から計測した入射波スペクトルは、Bretschneider・光易型スペクトルに対してあわせ込みが十分におこなわれていると判断できる。

なお、CASE1およびCASE2の堤体模型を設置した場合の不規則波の入射波スペクトルは、反射波吸収制御の効果から進行波実験における入射波スペクトルと違いがみられなかった。

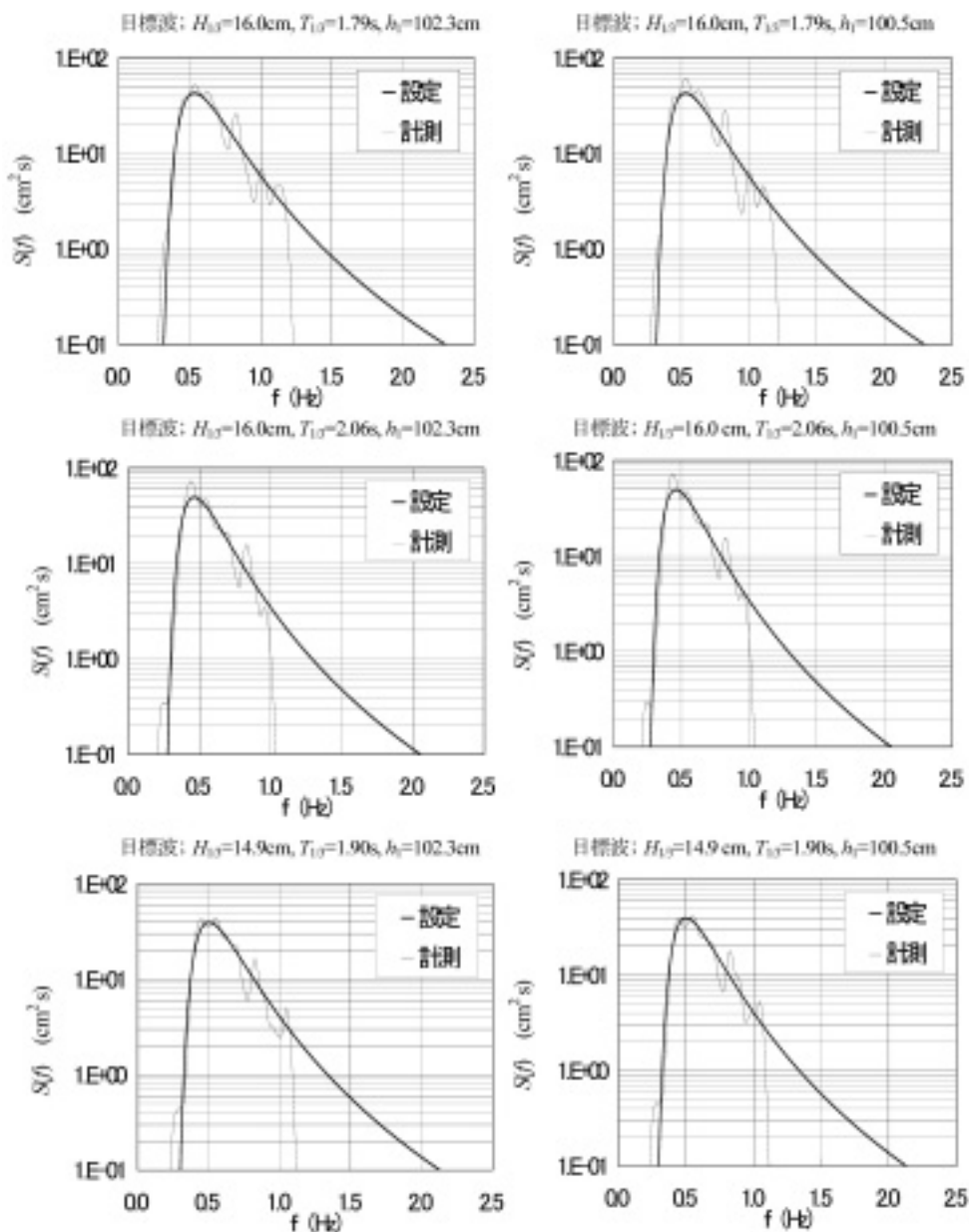


Fig. 9 . 入射波スペクトル

不規則波の波高分布

Table 3 に沖側の水路床で計測した不規則波の最高波高 $H_{max}$ 、1/10最大波高 $H_{1/10}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ の関係を示す。また、Fig. 10は造波波高分布をRayleigh分布(式(11))とあわせて示したものである。

$$p_r\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi H}{2 \bar{H}} \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} \quad (11)$$

ここで、 $P_r$ ：確率密度関数、 $H$ ：平均波高である。

進行波実験における各波高の関係は、表より $H_{max} = (1.42 \sim 1.73) H_{1/3}$ 、 $H_{1/10} = (1.25 \sim 1.33) H_{1/3}$ となっており、1/10最大波高と有義波高の関係は、ほぼRayleigh分布にしたがったものとなっていることがわかる。しかし、最高波高 $H_{max}$ は波浪条件によってバラツキがみられるとともに、一般的に海岸・海洋構造物の設計で

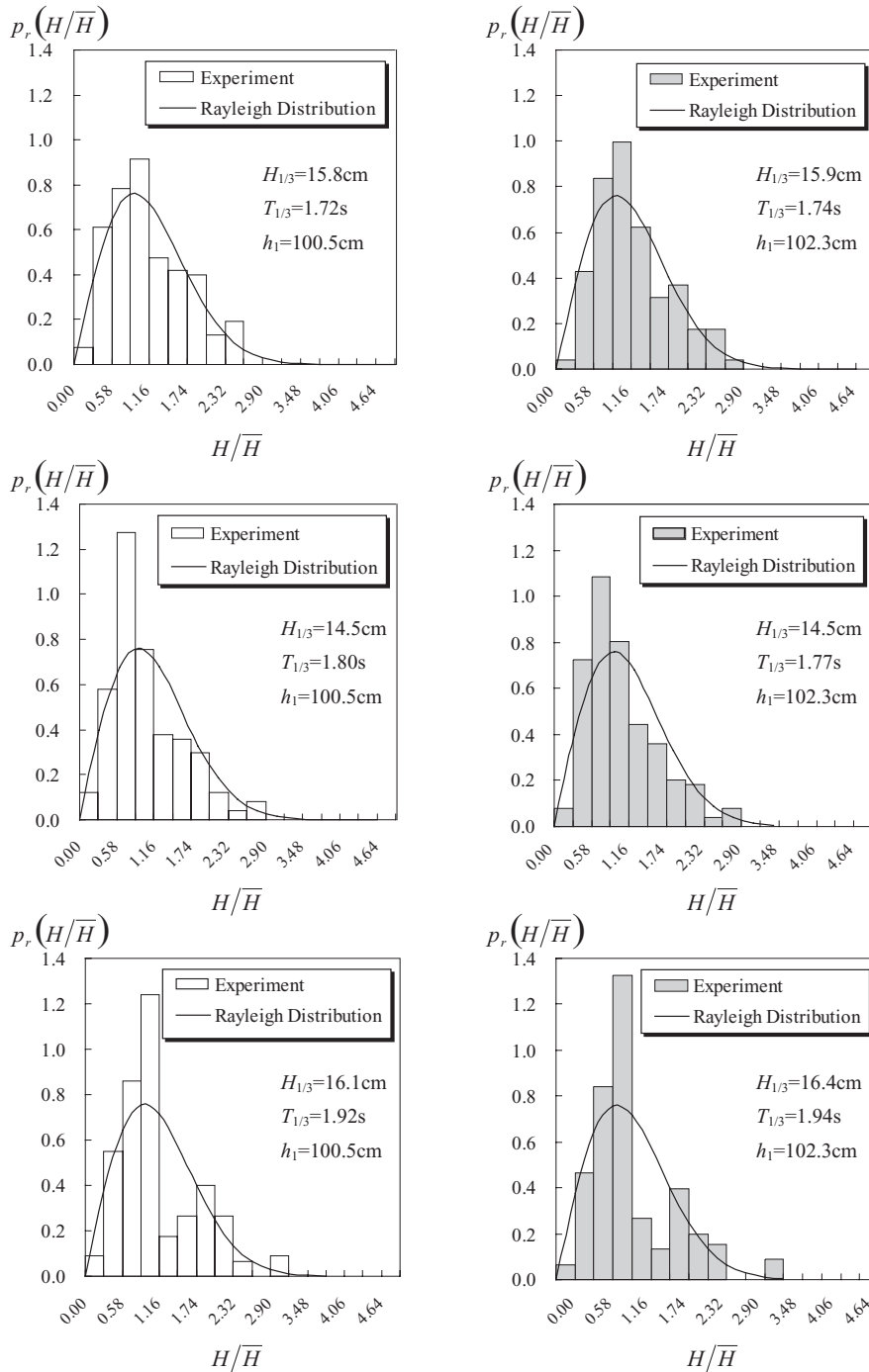


Fig. 10. 造波波高分布とRayleigh分布曲線

Table 3 . 不規則波の最高波高 $H_{max}$ , 1/10最大波高 $H_{1/10}$ , 有義波高 $H_{1/3}$ の関係

目標波高 (cm)	16.0	14.9	16.0	16.0	14.9	16.0
目標周期 (s)	1.79	1.90	2.06	1.79	1.90	2.06
造波水深 (cm)	100.5	100.5	100.5	102.3	102.3	102.3
$H_{max}$ (cm)	22.4	23.7	26.8	22.9	24.7	28.3
$H_{1/10}$ (cm)	19.8	18.9	20.9	20.2	19.3	21.4
$H_{1/3}$ (cm)	15.8	14.5	16.1	15.9	14.5	16.4
$T_{1/3}$ (s)	1.72	1.80	1.92	1.74	1.77	1.94
$H_{max} / H_{1/3}$	1.42	1.63	1.66	1.44	1.70	1.73
$H_{1/10} / H_{1/3}$	1.25	1.30	1.30	1.27	1.33	1.30

用いられる $H_{max} = (1.6 \sim 2.0) H_{1/3}$ の関係と比較すると、最高波高は小さいといえる。また、Rayleigh分布と比較して、平均波高よりも波高の大きい側で造波した波の出現頻度が小さいことが図からわかる。これらの理由としては、波形勾配が大きいことから沖側の水路床で碎波が生じており、特に波高の大きい波で波高減衰の影響が大きかったことが考えられる。また、実験で用いた造波システムでは、信号作成能力の限界から波のランダムさがおよそ50波分になっていることを確認している。いずれにしても作用波の諸元は、越波量実験、伝達波実験、波圧実験の各実験の実施に支障を生じることがないものと判断した。

### 越波量・伝達波実験

#### 遊水部における水位上昇量

Fig. 11は遊水部の中央における水位上昇量について、水理模型実験結果とVOF法計算結果とをあわせて示したものである。VOF法による水位上昇量 $\eta$ は、式(12)のとおり遊水部の中央における水位変動 $\eta(t)$ を5T分時間平均して算出した。図中では、直立堤設置水深 $h$ と換算沖波波高 $H_0'$ との比を横軸に、平均水位上昇量 $\bar{\eta}$ と $H_0'$ との比を縦軸として無次元化している。

$$\bar{\eta} = \frac{1}{5T} \int_{30-5T}^{30} \eta(t) dt \quad (12)$$

規則波の実験結果に着目するとCASE1, CASE2ともに水深波高比 $h/H_0'$ が1.0以下となる領域で水位上昇量・波高比 $\bar{\eta}/H_0'$ がおよそ0.25~0.38となっており、菅原, 山本(1978)による1/10勾配斜面地形での規則波の碎波に伴うWave Set-upと比較して、より大きな水位上昇が生じている。この水位上昇のメカニズムは、消波工の天端上を越波して遊水部へ打ち込む水量と、消波工が透過抵抗となりつつ遊水部から沖側へと戻る水量がバランスするために、遊水部において水位上昇が発生するという説明でできる。また、CASE1, CASE2の実験結果はともに $h/H_0'$ と $\bar{\eta}/H_0'$ がほぼ直線関係となっているが、消波工の天端高がより高いCASE2

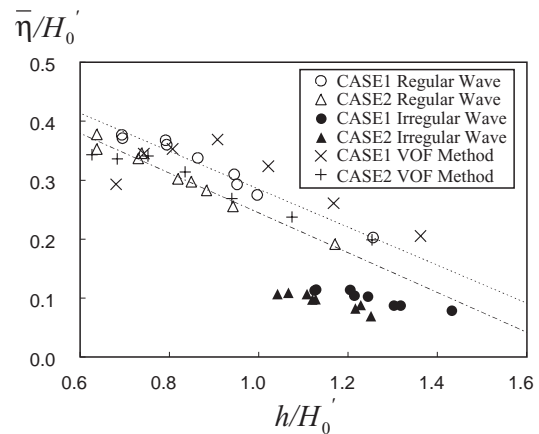


Fig. 11 . 遊水部における水位上昇量

の水位上昇量がCASE1と比較して15%程度小さいことがわかる。一方、不規則波では両ケースともに $\bar{\eta}/H_0' = 0.1$ 程度であり、規則波ほど明瞭な差がみられない。

計算結果と実験結果を比較すると、CASE1では一致度は必ずしも良いとはいえないものの、バラツキは概ね20%程度の範囲内におさまっている。CASE2では良好な一致を示しており、水位上昇量の算定においてVOF法が有効な検討手法であることがわかった。

### 越波特性

Fig. 12にCASE1の計算結果の一例を示す。T/8毎の時系列図であり、水表面はVOF関数 $F = 0.5$ でコンターを描いたものである。この時の進行波としての波は、Surf Similarity Parameter (碎波帯相似パラメータ) $\xi_0 = 0.43$ でありPlunging Breaker (巻き波碎波)とSpilling Breaker (崩れ波碎波)の遷移領域にあることから、S-P碎波を伴いながら波が構造体に作用している状況であるといえる。

図から遊水部付き消波工を有する堤体の越波特性としては、消波工の天端上を越波して遊水部へ打ち込む水塊が、遊水部幅の制約から直立堤前面壁にあたり鉛直方向に押し上げられることによって、越波が生じていることがわかる。また、先に述べた水位上昇のメカニズムについても、図から読み取ることができる。これらの現象は、水理模型実験においてみられたものと同じであり、VOF法が現象を適切に表現していることが明らかになった。

### 越波流量

Fig. 13は直立堤の天端高と換算沖波波高の比 $R/H_0'$ をパラメータとして無次元越波流量 $q/2gH_0'^3$ を示したものである。規則波および不規則波の実験結果とともに、

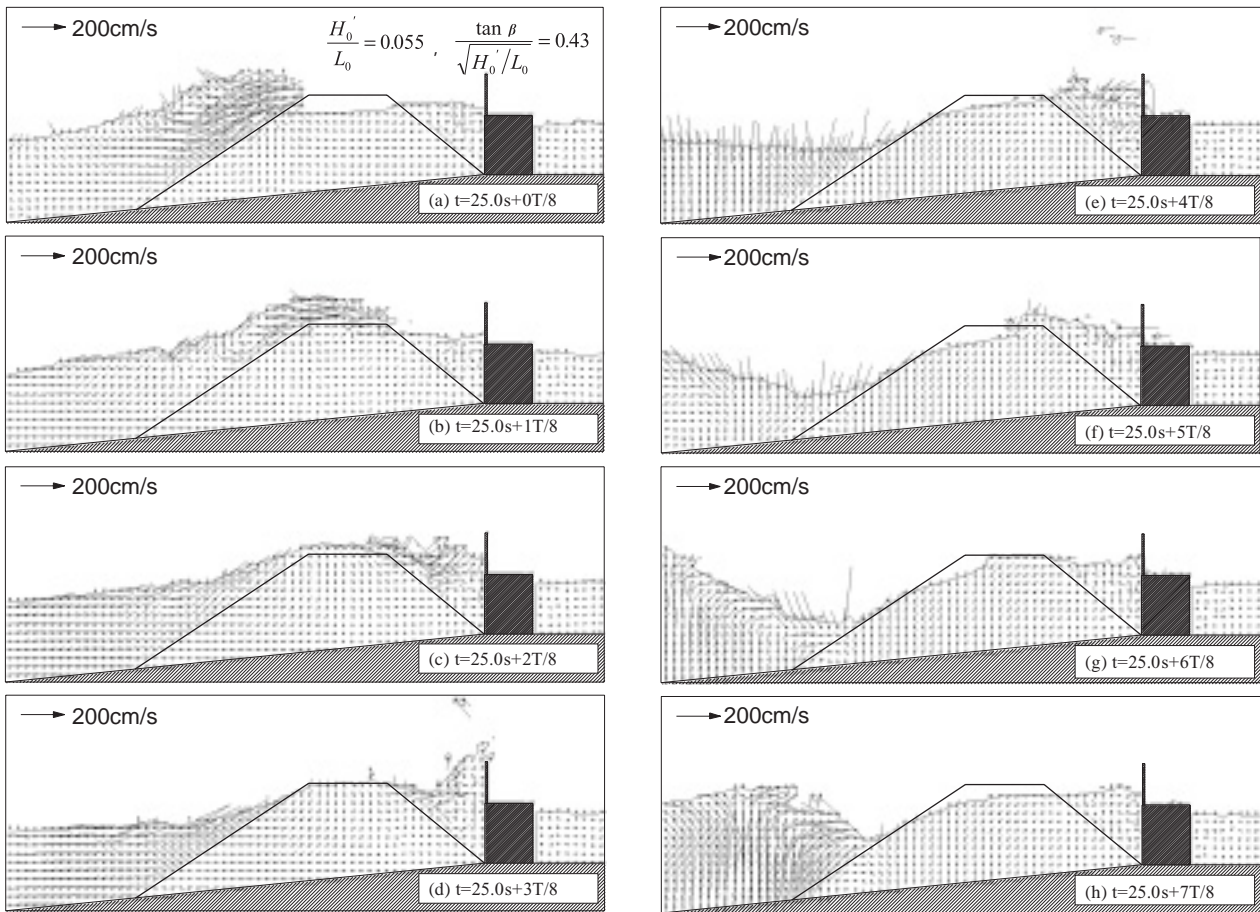


Fig. 12 . CASE1へ作用する波の状況 ( $H_0' = 27.5\text{cm}$ ,  $T = 1.79\text{s}$ , 表示範囲:  $250\text{cm} \times 90\text{cm}$ )

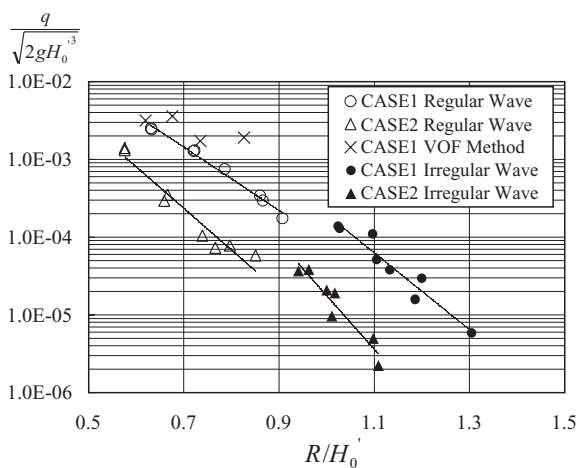


Fig. 13 . 無次元越波流量

$R/H_0'$  が小さくなるにしたがって無次元越波流量は指数関数状に増加しており、図中で直線関係が成立していることがわかる。同一の  $R/H_0'$  ではCASE1の方がCASE2よりも10倍程度越波流量が多い結果が得られた

が、これは消波工の天端上を越波・越流して遊水部へ打ち込む水量が消波工の天端高と換算沖波波高の比  $h_c/H_0'$  によって規定された効果であるといえる。また、不規則波の波群中のうち最高波によって引き起こされるであろう最大越波流量（短時間越波流量）が図中の規則波実験結果からほぼ推測できるものと仮定すると、最大越波流量は平均越波流量よりも100倍程度大きい値となることが推察される。Fig. 14に示すように、通常の消波ブロック被覆堤の期待越波流量（合田ら，1975）と比較すると、CASE1で1/3～1/10に、CASE2で1/10～1/50に越波流量を低減する性能を有していることが明らかになった。

Fig. 15はCASE1を対象におこなった越波流量  $q(t)$  の計算結果の一例を示したものである。波が1/10勾配斜面上で碎波しながら構造体に作用していることや、それによって引き起こされる水位の変動により、規則波ではあるものの各時間の越波流量にバラツキがみられる。本計算条件の場合、瞬間越波流量の最大値は平均越波流量の8.7～29.3倍、そしてその越波の作用時間はおおよそ  $T/5$  未満となっており、短時間に大きな越波が



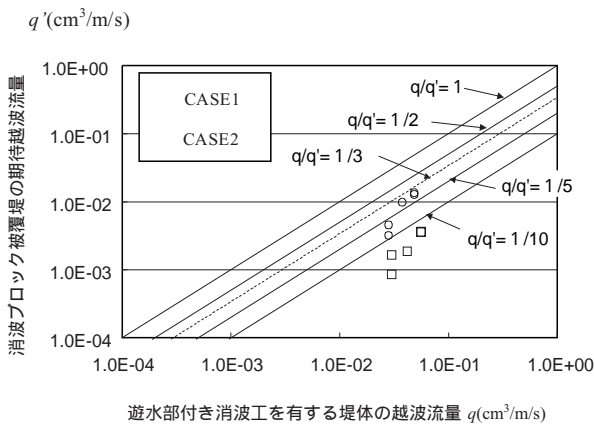


Fig. 14 . 遊水部付き消波工を有する堤体の不規則波越波流量と消波ブロック被覆堤の期待越波流量

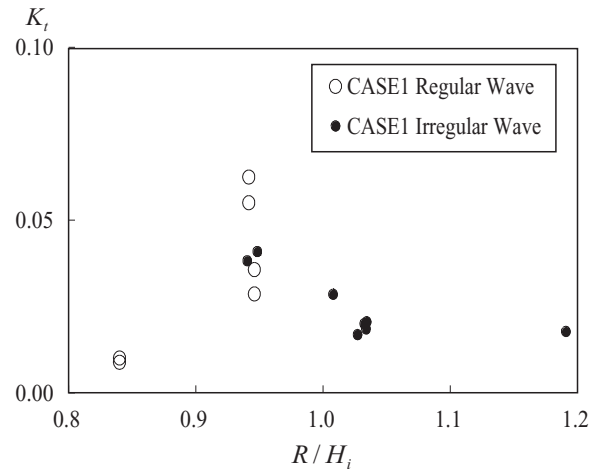


Fig. 16 . 波高伝達率

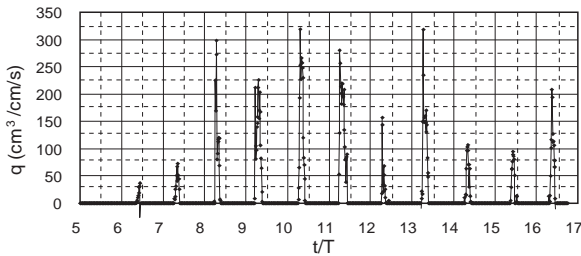


Fig. 15 . 越波流量の時系列 (VOF法,  $H_b = 27.5\text{cm}$ ,  $T = 1.79\text{s}$ )

生じていることがわかる。このため、平均越波流量のみならず短時間越波流量やその瞬間越波流量についても考慮することが施設利用上の観点から必要であるといえる。

数値計算結果では、上述したように定常状態としてどの時間の越波流量を平均化して平均越波流量を算定するのが妥当であるのか課題は残るが、ここでは式(13)に示すように計算時間の最後5T分を用いることとした。

$$q = \frac{1}{5T} \int_{30-5T}^{30} q(t) dt \quad (13)$$

こうして算定した平均越波流量を先に示したFig. 13に実験結果とあわせて記載した。CASE1の波高が大きい2ケースでは、計算結果および実験結果との越波流量の一致度は高いものの、ほかの2ケースでは最大4倍程度の差が生じている。また、図中でプロットした4ケース以外では越波流量が生じておらず、CASE2では有意な越波流量が計測されなかった。無次元越波流量が $10^{-3}$ より小さい値を示していないことから、これよりも小さい越波流量を計算するためには、より小

さい空間分解能が必要となることが推察される。VOF法では計算に多大な時間を要することから、現象に応じた空間分解能をどのように設定するのか今後課題が残るが、VOF法が有効な検討手法であることは明らかとなった。

#### 伝達波高

CASE1を対象におこなった伝達波高の実験結果をFig. 16に示す。図中では直立堤の天端高と進行波実験で計測した直立堤設置位置での進行波としての波高の比 $R/H_t$ をパラメータとして、波高伝達率 $K_t$ を整理している。波高伝達率は、直立堤背後1m地点で計測した伝達波高を直立堤設置位置の進行波としての波高で除したものと定義した。本構造体では越波量が小さいことから越波による2次波の発生も小さく、波高伝達率は規則波でも0.07程度が最大となっていることがわかる。CASE1は「手引」で要求される必要最小限の構造諸元であり、かつ漁港の防波堤の標準断面は $R/H_t = 1.0$ が一般的であることからすると、遊水部付き消波工を有する防波堤は越波による2次波の発生をほとんど生じないことが明らかになった。

#### 作用波圧 波圧強度

ここでは、CASE1の不規則波実験結果の一例を取りあげることとする。Fig. 17は直立壁で計測した作用波圧 $p$ について、各測定点での最大波圧強度と最大波力時の波圧強度、各測定点での1/10最大波圧強度と1/10最大波力時の波圧強度とをあわせて示したものである。図中では、堤体を設置しない状態で計測した直立堤設置位置での進行波としての有義波高 $H_{1/3}$ と水の単



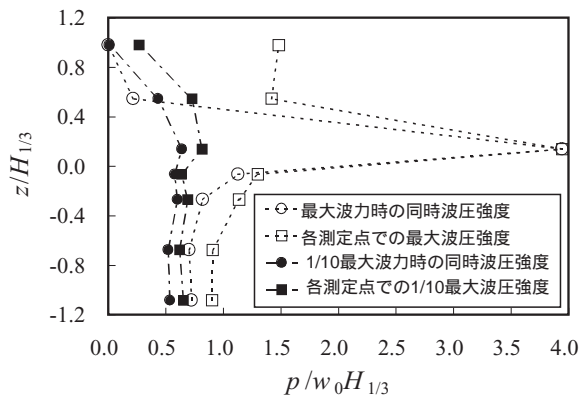


Fig. 17. 波圧強度分布  
(CASE1,  $H_{1/3}=19.6\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.74\text{s}$ ,  $h_c=21.0\text{cm}$ )

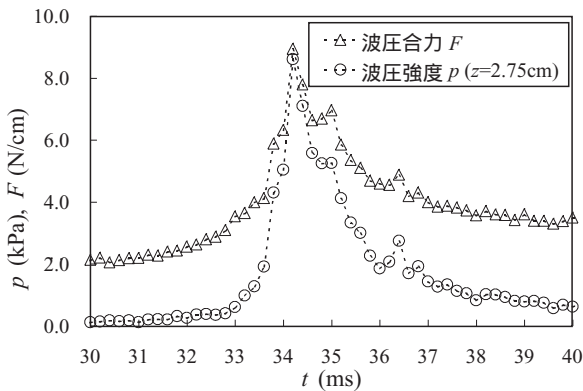


Fig. 18. 波圧強度および波圧合力の時系列  
(CASE1,  $H_{1/3}=19.6\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.74\text{s}$ ,  $h_c=21.0\text{cm}$ )

位体積重量  $w_0$  を用いて無次元表示した。静水面は  $z=0\text{cm}$  である。波条件は、実験波の中で最大波圧強度が大きかった  $H_{1/3}=19.6\text{cm}$ ,  $T_{1/3}=1.74\text{s}$ ,  $h_c=21.0\text{cm}$  である。図より静水面上  $z/H_{1/3}=0.14$  において  $p_{\max}/w_0 H_{1/3}=4.0$  程度となっており、衝撃的な波圧が作用していることがわかる。Fig. 18はこの時に記録された波圧の時系変化を示したものである。波圧合力および波圧強度の最大値が発生した前後 1ms 程度ではそれぞれの値がほぼ半減しており、衝撃的な波圧の作用は極めて短い時間で生じていることがわかる。この位置で最大波圧強度が生じるのは、遊水部での水位上昇による影響と考えられる。また、 $z/H_{1/3}=0.98$  に取り付けられた波圧計においては  $p_{\max}/w_0 H_{1/3}=1.5$  程度を記録しているが、これは波高の大きい時に消波工を越波した波が遊水部へ打ち込むことから生じたものと考えられる。しかしながら、同位置における最大波力発生時では  $p_{\max}/w_0 H_{1/3}=0$  となっており、波圧強度の最大値を記録

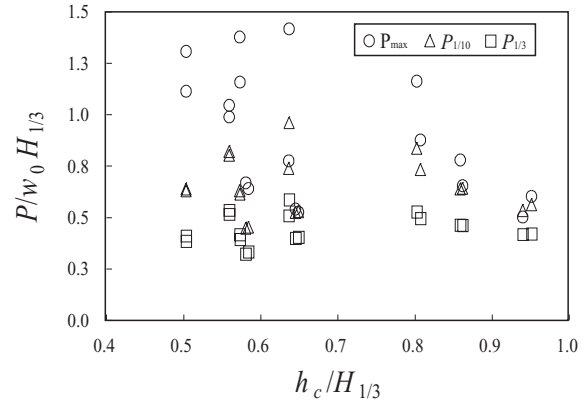


Fig. 19. 断面平均波圧強度

した時と最大波力発生時とのあいだに時間差があることがわかる。一方、1/10最大波力時の波圧強度については、静水面下および静水面上  $z/H_{1/3}=0.14$  の位置まで  $p_{1/10}/w_0 H_{1/3}=0.6$  程度のほぼ様な圧力分布であり、そこから静水面上  $1.0H_{1/3}$  で  $p_{1/10}/w_0 H_{1/3}=0$  となる三角形分布となっている。これは先にFig. 1で示した設計時の波圧分布と同じ波圧分布をなしていることがわかる。

#### 断面平均波圧強度

Fig. 19はCASE1およびCASE2の無次元断面平均波圧強度  $P/w_0 H_{1/3}$  を示す。横軸は消波工の天端高と進行波としての波高との比  $h_c/H_{1/3}$  をパラメータとした。ここでの断面平均波圧強度は、同時波圧合力のピーク値を取り出して、波の処理方法と同様に最大波力  $F_{\max}$ , 1/10最大波力  $F_{1/10}$ , 有義波力  $F_{1/3}$  を算定し、これらを  $(h_c + 0.5H_{1/3})$  で除した値をそれぞれ最大波圧強度  $P_{\max}$ , 1/10最大波圧強度  $P_{1/10}$ , 有義波圧強度  $P_{1/3}$  と定義した。

図より1/10最大、有義波圧強度ともに  $P/w_0 H_{1/3}$  が1.0未満の値になっていることがわかる。最大値については  $h_c/H_{1/3}=0.64$  程度でも  $P_{\max}/w_0 H_{1/3}$  が1.3をやや超えているが、中泉、山本(1989)の断面平均波圧強度の定義  $F_{\max}/(h_c + 0.5H_{\max})w_0 H_{1/3}$  によると、最大波圧強度についてもその値は1.3未満となる。よって、断面平均波圧強度としての取り扱いをすると、「手引」で採用されている波圧の設計公式は1/10勾配斜面においても適用できる結果となる。なお、先に述べたように波圧合力および波圧強度の最大値が発生した前後 1ms 程度でそれぞれの値がほぼ半減していることから、波圧合力および波圧強度の最大値の取り扱いについて、今後さらに検討する必要がある。

## まとめ

本研究では、遊水部付き消波工を有する堤体を1/10勾配という急勾配斜面かつ大水深に設置した場合を対象として、水理模型実験とVOF法の数値計算を実施した。これにより、遊水部付き消波工を有する堤体の越波流量、水位上昇量、伝達波高および直立堤への作用波圧などについて、その水理特性を概ねつかむことができた。主要な結果をまとめるとつぎのとおりである。

遊水部付き消波工を有する堤体の越波特性としては、消波工の天端上を越波して遊水部へ打ち込む水塊が、遊水部幅の制約から直立堤前面壁にあたり鉛直方向に押し上げられることによって、越波が生じる。

規則波の実験結果では、CASE1, CASE2ともに水深波高比 $h/H_0$ が1.0以下となる領域で水位上昇量・波高比 $\eta/H_0 = 0.25 \sim 0.38$ と大きな水位上昇が生じる。また、両ケースとも $h/H_0$ と $\eta/H_0$ は、ほぼ直線関係を示す。この水位上昇は、消波工の天端上を越波して遊水部へ打ち込む水量と、消波工が透過抵抗となりつつ遊水部から沖側へと戻る水量がバランスするために生じる。一方、不規則波は両ケースともに $\eta/H_0 = 0.1$ 程度であり、規則波ほど明瞭な差はみられない。

通常の消波ブロック被覆堤と比較すると、CASE1で1/3~1/10に、CASE2で1/10~1/50に越波流量を低減する性能がある。しかし、不規則波の波群のうち最高波によって引き起こされるであろう最大越波流量（短時間越波流量）を規則波実験結果から推測できるものと仮定すると、最大越波流量は平均越波流量よりも100倍程度大きい値となることが推察される。

VOF法の数値計算結果では、瞬間越波流量の最大値は平均越波流量の8.7~29.3倍、そしてその越波の作用時間はおよそ $T/5$ 未満となっており、短時間に大きな越波が生じている。このため、施設利用上の観点を踏まえると、平均越波流量のみならず短時間越波流量やその瞬間越波流量についても考慮することが必要である。

遊水部付き消波工を有する防波堤は、越波量が小さいことから越波による2次波の発生も小さい。漁港の防波堤の標準断面は $R/H_0 = 1.0$ が一般的であることから、既存の防波堤を遊水部付き消波工を有する防波堤に改良することにより、越波による2次波の発生を大きく抑制することができる。

波条件によっては、直立堤前面壁に衝撃的な波圧が発生することがある。ただし、最大波力および最大波圧の発生するピークの前後1ms程度では、それぞれの値がほぼ半減していた。また、断面平均波圧強度として取り扱おうと、「手引」で採用されている波圧の設計公式は1/10勾配斜面でも適用できる結果が得られたが、波圧合力および波圧強度の最大値の取り扱いを今後、さらに検討する必要がある。遊水部付き消波工を有する堤体の越波現象の検討において、VOF法の適用が有効であることがわかった。しかし、計算に多大な時間を要することもあり、現象に応じた空間分解能をどのように適切に設定するのか、今後の課題である。

## おわりに

本研究の水理模型実験は、福井県越前漁港事務所から当研究所への委託業務「平成15年度広域漁港整備事業（特定）水理模型実験業務委託その3」および「平成15年度広域漁港整備事業（特定）水理模型実験業務委託その9」でおこなった水理模型実験のうち、遊水部付き消波工を有する堤体に係る部分を取りまとめたものである。水理模型実験の計測業務は、国際気象海洋株式会社、白土和幸、小林 学、滑川 順の3氏によっておこなわれた。

進行波実験、越波量実験、伝達波実験、波圧実験の各実験結果の一覧表をAppendix 1, 2, 3, 4にそれぞれ示す。

## 参考文献

- Amsden A. A. and Harlow F. H., 1970: The SMAC Method: A numerical technique for calculating incompressible fluid flows. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*, LA-4370, 1-85.
- 土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会, 1999: 水理公式集 [平成11年版], 社団法人土木学会, 東京, 713pp.
- 沿岸開発技術研究センター, 2001: 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF) - 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書 -, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 財団法人沿岸開発技術研究センター, 東京, 296pp.
- Eric Cruz, 横木裕宗, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 1993: 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について. 海岸工学論文集, 40, 46-50.

- 合田良実, 1968: 造波水路における波浪実験の二, 三の問題点について. 第15回海岸工学講演会講演集, 50-57.
- 合田良実, 岸良安治, 神山 豊, 1975: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究. 港湾技術研究所報告, 14(4), 3-44.
- 合田良実, 岸良安治, 1976: 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験. 港湾技研資料, 242, 1-28.
- 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・反射波の分離推定法. 港湾技研資料, 248, 1-24.
- 合田良実, 1990: [増補改訂] 港湾構造物の耐波設計 - 波浪工学への序説 -, 鹿島出版会, 東京, 333pp.
- 影山智将, 山本正昭, 1981: 離岸タイプ消波工の効果について. 水産工学研究所技報, 水産土木, 2, 51-66.
- 間辺本文, 山本正昭, 1988: 遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究 - 南部海岸における越波対策 -. 水産工学研究所技報, 水産土木, 10, 67-77.
- 森平倫生, 柿崎秀作, 菊谷 徹, 1967: 異形ブロックの波力減殺効果に関する研究. 港湾技術研究所報告, 6(4), 3-31.
- 中泉昌光, 山本正昭, 1989: 遊水部付消波工を有する防波堤に働く不規則波力に関する実験的研究. 水産工学研究所技報, 水産土木, 11, 11-23.
- 中村孝幸, 大村智宏, 大井邦昭, 2003: 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について. 海岸工学論文集, 50, 806-810.
- 中山哲嚴, 山本正昭, 間辺本文, 1986: 遊水部を有する消波工付護岸の越波に対する研究 (不規則波実験). 水産工学研究所技報, 水産土木, 7, 217-229.
- Nichols B. D., Hirt C. W., and Hotchkiss R. S., 1980: SOLA-VOF: A solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries. *Los Alamos Scientific Laboratory*, LA-8355, 1-119.
- 西 裕司, 山本正昭, 1981: 遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する実験的研究. 水産工学研究所技報, 水産土木, 2, 33-49.
- 西 裕司, 山本正昭, 1982: 遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する研究. 水産工学研究所報告, 3, 127-142.
- 大村智宏, 中村孝幸, 大井邦昭, 中山哲嚴, 2003: 下部通水式海水交換型防波堤の波浪制御効果に及ぼす通水路の影響について. 海洋開発論文集, 19, 547-552.
- Ohmura Y., Nakamura T., and Ohi K., 2005: Excitation of vortex induced currents by piston mode wave resonance in double-curtain walled breakwaters. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE.
- 佐伯 浩, 菊地秀明, 京谷 修, 松井弘夫, 尾崎 晃, 1980: 分離式防波堤の水理機能と設計波圧について. 第27回海岸工学講演会論文集, 335-338.
- 榊山 勉, 阿部宣行, 鹿島遼一, 1990: ポーラスボディモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動場解析. 海岸工学論文集, 37, 554-558.
- 榊山 勉, 今井澄雄, 1996: 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション. 海岸工学論文集, 43, 696-700.
- 榊山 勉, 香山真祐, 1997: 海底斜面上で碎波を伴う消波護岸への越波の数値計算. 海岸工学論文集, 44, 741-745.
- 笹島隆彦, 山中浩次, 木村克俊, 水野雄三, 菊地聡一, 1993: 2重堤の水理特性について. 海岸工学論文集, 40, 645-649.
- 榎木 亨, 岩田好一朗, 森永勝登, 1975: 海岸堤防前面波高におよぼす離岸堤の設置距離の効果について (2次元モデルの場合) - 離岸堤の効果に関する研究 第2報 -. 第22回海岸工学講演会論文集, 415-420.
- 首藤伸夫, 1974: 非線形長波の変形 - 水路幅, 水深の変化する場合 -. 第21回海岸工学講演会論文集, 57-64.
- 菅原輝男, 山本正昭, 1978: 規則波の浅水変形計算モデル. 農業土木試験場D (水産土木), 20, 1-21.
- 水産庁監修, 2003: 漁港・漁場の施設の設計の手引 (2003年版), 社団法人全国漁港漁場協会, 東京, 1008pp.
- 高山知司, 神山 豊, 1976: 実験水路における波の伝播について. 第23回海岸工学講演会論文集, 381-385.
- Torrey M. D., Cloutman L. D., Mjolsness R. C., and Hirt C. W., 1985: NASA-VOF2D: A computer program for incompressible flows with free surfaces. *Los Alamos National Laboratory*, LA-10612-MS, 1-137.
- 山本泰司, 水野雄三, 鈴木孝信, 山中浩次, 吉田 稔, 1996: 二重堤直立部に作用する波力の算定法について. 海岸工学論文集, 43, 766-770.
- 山本泰司, 水野雄三, 鈴木孝信, 笹島隆彦, 松本英明, 桑原幸司, 1997: 二重堤の越波流量算定法について. 海洋開発論文集, 13, 585-590.

Appendix 1(1)．進行波実験結果（造波水深100.5cm）

作用波	目標波高・周期 H (cm) T (s)	計測位置 斜面肩から (cm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1-2	反射率	
			0	60	100	150	200	300	480	600	-100	-200	-400	水路床		
規則波	16.1 1.79	水深 (cm)	20.5	26.5	30.5	35.5	40.5	50.5	68.5	80.5	20.5	20.5	20.5	100.5		
		$H_{mean}$ (cm)	21.3	20.0	17.4	16.9	17.5	15.3	15.3	15.3	15.3	16.2	10.8	9.0	16.2	
		$T_{mean}$ (s)	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.50	1.79	1.79	1.78	0.136
	20.0 1.79	$m$ (cm)	-0.46	-0.09	-0.16	-0.10	-0.12	-0.28	-0.01	-0.01	-0.11	0.65	1.10	1.07	-	
		$H_{mean}$ (cm)	23.6	26.2	24.9	22.1	22.8	19.7	20.3	19.9	19.9	11.7	12.9	8.5	21.8	
		$T_{mean}$ (s)	1.81	1.79	1.79	1.79	1.78	1.79	1.78	1.78	1.78	1.30	1.80	1.64	1.79	0.115
	23.9 1.79	$m$ (cm)	-0.04	-0.14	-0.23	-0.35	-0.33	-0.51	-0.28	-0.31	1.44	1.76	2.03	-		
		$H_{mean}$ (cm)	19.6	27.9	28.8	27.3	27.6	24.1	25.4	24.9	14.4	12.1	8.9	25.0		
		$T_{mean}$ (s)	1.41	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.80	1.79	1.80	1.77	0.209	
	28.0 1.79	$m$ (cm)	1.24	-0.04	-0.51	-0.71	-0.59	-0.62	-0.77	-0.84	2.42	2.77	-			
		$H_{mean}$ (cm)	16.7	28.3	29.2	29.6	31.4	26.6	27.7	27.3	11.3	11.9	7.1	27.6		
		$T_{mean}$ (s)	1.23	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.65	1.79	1.29	1.78	0.188	
不規則波	16.0 1.79	$m$ (cm)	0.91	0.28	-0.63	-0.86	-0.52	-0.76	-0.86	-0.84	3.13	3.30	-			
		$H_{max}$ (cm)	26.9	28.3	27.2	27.4	26.2	25.8	24.7	23.0	21.7	16.6	15.1	22.4		
		$H_{1/10}$ (cm)	22.7	22.4	21.6	20.5	20.8	19.6	19.8	20.0	17.7	15.1	12.4	19.8		
	16.0 2.06	$H_{1/3}$ (cm)	18.3	17.5	17.0	15.9	16.0	15.3	15.2	15.3	15.1	13.2	11.0	15.8	0.096	
		$T_{1/3}$ (s)	1.81	1.78	1.72	1.78	1.78	1.75	1.79	1.76	1.84	1.96	2.01	1.72		
		$m$ (cm)	-0.11	-0.16	-0.10	-0.07	-0.06	0.03	0.02	0.07	0.09	0.24	0.40	-		
	14.9 1.90	$H_{max}$ (cm)	25.6	32.8	29.4	27.6	26.6	24.7	26.6	23.6	21.9	17.9	16.7	26.8		
		$H_{1/10}$ (cm)	23.5	25.8	24.4	21.7	21.1	19.9	21.1	18.7	17.7	14.5	12.5	20.9		
		$H_{1/3}$ (cm)	19.4	19.3	18.1	16.4	16.0	14.9	15.1	14.0	15.2	12.8	11.0	16.1	0.086	
	14.9 1.90	$T_{1/3}$ (s)	2.03	2.03	1.99	1.98	2.01	1.96	1.93	1.90	1.97	2.01	2.15	1.92		
		$m$ (cm)	-0.04	-0.06	-0.05	-0.08	-0.02	-0.01	-0.02	0.07	0.18	0.34	0.47	-		
		$H_{max}$ (cm)	22.8	25.4	24.2	21.9	19.8	21.1	24.0	24.3	19.0	16.5	16.0	23.7		
14.9 1.90	$H_{1/10}$ (cm)	21.0	20.0	19.0	17.8	16.7	16.8	17.0	17.1	17.7	14.6	12.0	18.9			
	$H_{1/3}$ (cm)	17.1	16.0	15.1	14.3	13.7	13.1	13.2	13.3	15.5	12.8	10.8	14.5	0.098		
	$T_{1/3}$ (s)	1.89	1.85	1.83	1.82	1.81	1.82	1.78	1.75	1.88	1.91	1.98	1.80			
14.9 1.90	$m$ (cm)	-0.10	-0.09	-0.09	-0.02	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.18	0.26	-			

m: 時間平均水位（上昇がプラス）

Appendix 1(2). 進行波実験結果 (造波水深102.3cm)

作用波	目標波高・周期		計測位置	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	1-2	反射率		
	H (cm)	T (s)		0	60	100	150	200	300	480	600	-100	-200	-400	水路床			
規則波	16.1	1.79	水深 (cm)	22.3	28.3	32.3	37.3	42.3	52.3	70.3	82.3	22.3	22.3	22.3	102.3	0.229		
			$H_{\text{mean}}$ (cm)	20.5	20.4	18.1	15.6	17.1	14.7	14.9	16.3	16.3	14.0	12.1	9.1		16.2	
			$T_{\text{mean}}$ (s)	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.80	1.79	1.80	1.79	1.49	1.73		1.79	1.77
	20.0	1.79	$m$ (cm)	-0.23	0.07	-0.19	-0.26	-0.23	-0.09	-0.20	-0.20	-0.13	0.10	0.84	0.90	-	0.126	
			$H_{\text{mean}}$ (cm)	24.1	24.9	24.0	20.8	20.7	19.6	20.5	19.6	20.5	19.5	12.4	11.0	7.7		21.1
			$T_{\text{mean}}$ (s)	1.79	1.78	1.78	1.79	1.79	1.80	1.79	1.80	1.79	1.79	1.21	1.50	1.26		1.78
	23.9	1.79	$m$ (cm)	-0.24	-0.13	-0.03	-0.19	-0.33	-0.40	-0.31	-0.44	-0.44	0.76	1.48	1.69	-	0.212	
			$H_{\text{mean}}$ (cm)	21.4	28.3	28.4	26.3	25.8	24.1	24.9	24.1	24.9	24.4	12.8	12.9	7.4		24.8
			$T_{\text{mean}}$ (s)	1.52	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.41	1.80	1.29		1.78
	28.0	1.79	$m$ (cm)	0.27	-0.50	-0.73	-0.78	-0.81	-0.52	-0.77	-0.77	-0.71	1.13	1.92	2.21	-	0.218	
			$H_{\text{mean}}$ (cm)	22.0	29.0	30.8	30.1	30.1	27.5	28.8	27.3	27.3	10.7	14.0	8.8	27.7		
			$T_{\text{mean}}$ (s)	1.42	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.32	1.80	1.64		1.77
不規則波	16.0	1.79	$m$ (cm)	1.46	-0.09	-0.68	-0.76	-0.84	-0.47	-0.86	-0.83	1.82	2.76	2.95	-	0.108		
			$H_{\text{max}}$ (cm)	26.0	26.1	25.3	26.4	26.2	26.1	26.5	26.5	26.3	24.1	22.4	14.9		22.9	
			$H_{1/10}$ (cm)	23.2	22.0	20.8	19.9	20.1	19.8	19.7	19.7	19.3	19.3	19.6	16.1		13.2	20.2
	16.0	2.06	$H_{1/3}$ (cm)	18.6	17.5	16.6	16.0	15.6	15.4	15.3	15.0	15.0	16.5	13.6	11.7	15.9	0.091	
			$T_{1/3}$ (s)	1.85	1.77	1.75	1.74	1.74	1.73	1.74	1.74	1.72	1.84	1.89	1.98	1.74		
			$m$ (cm)	-0.11	-0.06	-0.07	-0.07	-0.03	-0.05	-0.03	-0.03	0.03	0.03	0.11	0.17	0.28		-
	14.9	1.90	$H_{\text{max}}$ (cm)	25.8	31.7	31.4	28.4	27.8	26.3	26.3	27.6	25.5	22.1	19.3	14.9	28.3	0.096	
			$H_{1/10}$ (cm)	24.5	26.7	25.6	22.8	22.2	21.4	21.9	20.5	20.5	18.4	16.0	13.7	21.4		
			$H_{1/3}$ (cm)	19.7	21.2	18.9	17.2	16.9	15.7	15.5	14.9	14.9	15.9	14.1	12.2	16.4		
	14.9	1.90	$T_{1/3}$ (s)	2.01	2.00	2.02	2.00	1.99	1.96	1.93	1.93	1.93	2.05	2.04	2.17	1.94	0.091	
			$m$ (cm)	-0.09	-0.14	-0.13	-0.02	0.00	-0.01	0.02	0.04	0.04	0.09	0.28	0.40	-		
			$H_{\text{max}}$ (cm)	24.2	25.6	26.3	22.8	21.7	21.3	24.4	24.6	24.6	20.2	17.7	14.7	24.7		
14.9	1.90	$H_{1/10}$ (cm)	21.7	20.3	19.8	17.8	17.2	17.0	17.1	17.5	18.3	15.1	12.4	19.3	0.096			
		$H_{1/3}$ (cm)	17.8	16.1	15.7	14.4	13.9	13.6	13.6	13.5	13.5	15.6	13.3	11.3		14.5		
		$T_{1/3}$ (s)	1.90	1.87	1.85	1.85	1.86	1.78	1.81	1.78	1.81	1.85	1.92	2.03		1.77		
14.9	1.90	$m$ (cm)	-0.09	-0.05	-0.02	0.01	0.03	0.06	0.03	0.03	-0.01	0.05	0.18	0.25	-	0.096		

m: 時間平均水位 (上昇がプラス)



Appendix 2 (1). 越波量実験結果 (CASE1, 規則波実験)

水路床での入射波 $H$ (cm)	$T$ (s)	計測項目 計測位置	波高・周期・時間平均水位								反射率	越波水 重量 (kgf)	換算沖波波高・越波流量 $H_0$ (cm)	$q$ ( $\text{cm}^3/\text{cm/s}$ )	無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$
			5	6	7	8	9	10	10	1-2					
		堤体から(cm)	10	150	200	300	480	600	600	水路床					
16.3	1.77	$H$ (cm)	5.34	14.86	17.02	14.14	16.60	18.31	16.27	16.27					
		$T$ (s)	0.86	1.79	1.79	1.79	1.80	1.80	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	3.58	-0.70	-0.28	-0.28	0.03	-0.03	-	-					5.35E-05
20.5	1.78	$H$ (cm)	7.45	19.01	21.02	17.92	19.14	21.27	20.50	20.50					
		$T$ (s)	0.90	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78					
		$m$ (cm)	6.12	-0.95	-0.39	-0.52	0.01	-0.03	-	-					1.72E-04
21.5	1.79	$H$ (cm)	10.41	19.77	21.90	18.65	20.87	21.82	21.47	21.47					
		$T$ (s)	1.00	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79					
		$m$ (cm)	6.83	-0.96	-0.47	-0.72	-0.02	-0.10	-	-					2.93E-04
23.7	1.77	$H$ (cm)	10.03	23.90	24.98	21.46	22.43	25.31	23.66	23.66					
		$T$ (s)	0.87	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	8.68	-1.47	-0.82	-0.77	-0.29	-0.23	-	-					7.42E-04
21.6	1.77	$H$ (cm)	10.22	21.10	22.65	19.33	20.31	22.84	21.62	21.62					
		$T$ (s)	1.09	1.79	1.79	1.79	1.78	1.79	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	7.28	-0.93	-0.24	-0.29	-0.09	0.07	-	-					3.38E-04
25.8	1.77	$H$ (cm)	11.14	27.08	27.46	25.05	25.64	28.75	25.81	25.81					
		$T$ (s)	0.85	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	10.31	-1.47	-0.90	-0.60	-0.37	-0.24	-	-					1.27E-03
25.7	1.78	$H$ (cm)	14.20	26.35	28.22	24.35	24.62	28.44	25.73	25.73					
		$T$ (s)	1.32	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78					
		$m$ (cm)	10.07	-1.45	-0.69	-0.73	-0.25	-0.16	-	-					1.29E-03
29.5	1.77	$H$ (cm)	16.16	31.36	33.22	28.93	29.40	32.69	29.45	29.45					
		$T$ (s)	1.31	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	12.06	-1.80	-1.00	-0.74	-0.55	-0.21	-	-					2.49E-03
29.4	1.77	$H$ (cm)	14.35	32.78	33.51	28.38	28.74	32.07	29.39	29.39					
		$T$ (s)	1.16	1.79	1.79	1.79	1.79	1.78	1.77	1.77					
		$m$ (cm)	11.86	-1.90	-0.87	-0.76	-0.52	-0.21	-	-					2.40E-03

Appendix 2(2). 越波量実験結果 (CASE1, 不規則波実験)

水路床での入射波 $H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	計測項目		波高・周期・時間平均水位							反射率	越波水 重量 (kgf)	換算沖波波高・越波流量 $H_0'$ (cm)	$q$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$ )	無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0'^3}$		
		計測位置	堤体から(cm)	5	6	7	8	9	10	600						10	1-2
14.2	1.83	$H_{1/3}$ (cm)	堤体から(cm)	10	15.0	13.27	15.03	14.37	13.71	14.21	14.21	0.285	0.26	14.21	15.53	0.02	5.87E-06
		$T_{1/3}$ (s)		2.20	1.94	1.81	1.98	1.93	1.93	1.83	1.83						
		$T_{1/3}$ (cm)		1.22	-0.21	-0.04	0.08	0.04	0.05	-	-						
15.6	1.88	$H_{1/3}$ (cm)		9.00	14.27	14.56	16.19	15.57	15.06	15.63	15.63	0.286	0.81	15.63	17.08	0.05	1.59E-05
		$T_{1/3}$ (s)		2.26	1.90	1.81	1.96	1.93	1.96	1.88	1.88						
		$T_{1/3}$ (cm)		1.49	-0.24	-0.06	0.05	0.04	0.07	-	-						
15.5	1.86	$H_{1/3}$ (cm)		9.11	13.88	14.40	15.90	15.39	14.85	15.45	15.45	0.283	1.49	15.45	16.89	0.09	2.97E-05
		$T_{1/3}$ (s)		2.32	1.94	1.81	1.96	1.93	1.88	1.86	1.86						
		$T_{1/3}$ (cm)		1.48	-0.22	-0.04	0.11	0.05	0.08	-	-						
16.8	1.87	$H_{1/3}$ (cm)		9.91	16.46	16.65	17.92	16.92	16.24	16.84	16.84	0.267	2.93	16.84	18.32	0.18	5.16E-05
		$T_{1/3}$ (s)		2.22	1.94	1.77	1.91	1.88	1.82	1.87	1.87						
		$T_{1/3}$ (cm)		1.91	-0.28	-0.07	0.00	0.02	0.07	-	-						
16.4	1.81	$H_{1/3}$ (cm)		9.12	15.47	16.58	17.43	16.90	16.03	16.43	16.43	0.270	2.08	16.43	17.88	0.13	3.80E-05
		$T_{1/3}$ (s)		2.00	1.92	1.78	1.89	1.90	1.83	1.81	1.81						
		$T_{1/3}$ (cm)		1.83	-0.27	-0.04	0.09	0.03	0.07	-	-						
17.0	1.86	$H_{1/3}$ (cm)		11.01	17.01	16.39	18.90	17.81	17.27	16.97	16.97	0.276	6.34	16.97	18.47	0.39	1.10E-04
		$T_{1/3}$ (s)		2.21	2.02	1.80	2.00	1.98	1.95	1.86	1.86						
		$T_{1/3}$ (cm)		2.11	-0.33	-0.10	0.10	0.06	0.09	-	-						
18.0	1.97	$H_{1/3}$ (cm)		12.34	18.88	16.84	20.06	18.12	18.02	18.00	18.00	0.286	8.20	18.00	19.72	0.50	1.29E-04
		$T_{1/3}$ (s)		2.45	2.11	2.01	2.12	2.04	2.11	1.97	1.97						
		$T_{1/3}$ (cm)		2.26	-0.30	-0.13	0.15	0.05	0.11	-	-						
18.1	1.97	$H_{1/3}$ (cm)		12.93	18.67	16.59	19.79	18.09	17.69	18.06	18.06	0.283	8.80	18.06	19.78	0.54	1.38E-04
		$T_{1/3}$ (s)		2.46	2.12	1.96	2.08	2.04	2.04	1.97	1.97						
		$T_{1/3}$ (cm)		2.24	-0.32	-0.12	0.11	0.03	0.08	-	-						

Appendix 2(3). 越波量実験結果 (CASE2, 規則波実験)

H (cm)	T (s)	計測項目 計測位置	波高・周期・時間平均水位								反射率	越波水 重量 (kgf)	換算沖波波高・越波流量 H (cm) H <sub>0</sub> (cm) q (cm <sup>3</sup> /cm/s)	無次元越波流量 q/√2gH <sub>0</sub> <sup>3</sup>			
			5	6	7	8	9	10	10	1-2 水路床							
16.1	1.77	H (cm)	10	17.13	12.26	16.13	17.34	17.05	16.08								
		T (s)	5.16	1.80	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.77							
		m	3.34	-0.96	-0.58	-0.18	0.23	-0.01	-		0.207	0.00	0.00	0.00	0.00E+00		
21.3	1.78	H (cm)	10	22.71	16.48	21.10	22.91	21.50	21.31								
		T (s)	8.66	1.42	1.78	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78							
		m	6.54	-1.49	-0.89	-0.39	0.13	-0.19	-		0.208	0.34	0.38	0.38	7.68E-05		
20.0	1.79	H (cm)	10	22.04	17.16	19.70	21.01	20.75	19.97								
		T (s)	6.26	0.95	1.78	1.79	1.79	1.80	1.79	1.79							
		m	5.54	-1.45	-0.70	-0.49	0.23	-0.05	-		0.114	0.23	0.26	0.26	5.73E-05		
23.0	1.80	H (cm)	10	26.08	18.07	22.84	24.78	23.14	22.97								
		T (s)	8.40	1.04	1.79	1.80	1.80	1.79	1.80	1.80							
		m	7.54	-1.53	-0.46	-0.52	0.22	-0.19	-		0.155	0.51	0.57	0.57	1.03E-04		
22.2	1.81	H (cm)	10	25.44	19.20	21.66	22.86	22.33	22.17								
		T (s)	7.39	0.98	1.79	1.80	1.79	1.79	1.81	1.81							
		m	7.16	-1.43	-0.70	-0.47	0.26	0.00	-		0.146	0.34	0.38	0.38	7.24E-05		
25.5	1.78	H (cm)	10	30.89	21.31	25.56	27.61	25.96	25.50								
		T (s)	9.40	1.05	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.78							
		m	9.58	-2.18	-1.17	-0.63	0.27	-0.43	-		0.137	1.99	2.22	2.22	3.44E-04		
25.8	1.81	H (cm)	10	31.57	23.44	26.10	27.38	26.86	25.77								
		T (s)	7.38	0.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.81	1.81							
		m	9.44	-1.90	-1.05	-0.77	0.23	-0.24	-		0.164	1.69	1.89	1.89	2.87E-04		
29.5	1.77	H (cm)	10	34.05	26.53	31.21	32.21	30.70	29.51								
		T (s)	9.85	0.94	1.79	1.79	1.79	1.78	1.77	1.77							
		m	12.11	-2.79	-1.65	-0.26	-0.40	-0.36	-		0.270	9.99	11.16	11.16	1.39E-03		
29.5	1.78	H (cm)	10	34.63	28.62	30.47	31.59	30.50	29.51								
		T (s)	10.05	1.00	1.79	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78							
		m	11.31	-2.97	-1.36	-0.36	-0.66	-0.18	-		0.149	9.32	10.41	10.41	1.29E-03		

Appendix 2(4). 越波量実験結果 (CASE2, 不規則波実験)

水路床での入射波 $H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	計測項目 計測位置	波高・周期・時間平均水位							反射率	越波水 重量 (kgf)	換算沖波波高・越波流量 $H'$ (cm)	$q$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{s}$ )	無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$	
			5	6	7	8	9	10	1-2						
		堤体から $H_{1/3}$ (cm)	10	150	200	300	480	600	水路床						
15.0	1.82	$T_{1/3}$ (s)	6.64	14.13	11.05	15.79	14.21	13.81	14.99						
		$T_{1/3}$ (s)	2.14	2.05	1.75	1.99	1.92	1.97	1.82						
		$T_{1/3}$ (s)	1.14	-0.26	0.12	0.08	0.05	0.06	-						
15.3	1.86	$H_{1/3}$ (cm)	6.88	15.51	11.95	16.90	15.91	15.06	15.27						
		$T_{1/3}$ (s)	2.15	2.01	1.75	2.00	1.93	1.93	1.86						
		$T_{1/3}$ (s)	1.47	-0.26	0.04	0.13	10.22	0.11	-						
15.4	1.85	$H_{1/3}$ (cm)	7.00	15.68	12.22	17.10	16.12	15.40	15.42						
		$T_{1/3}$ (s)	2.28	2.05	1.76	1.99	1.94	1.96	1.85						
		$T_{1/3}$ (s)	1.39	-0.29	-0.16	0.09	0.05	0.09	-						
16.8	1.84	$H_{1/3}$ (cm)	7.88	17.51	14.31	18.68	16.97	16.25	16.82						
		$T_{1/3}$ (s)	2.19	1.95	1.73	1.93	1.90	1.85	1.84						
		$T_{1/3}$ (s)	1.79	-0.35	-0.16	0.07	0.08	0.08	-						
16.7	1.86	$H_{1/3}$ (cm)	8.25	17.78	14.45	18.90	17.30	16.46	16.71						
		$T_{1/3}$ (s)	2.24	2.01	1.75	1.94	1.91	1.85	1.86						
		$T_{1/3}$ (s)	1.79	-0.39	-0.19	0.06	0.04	0.08	-						
17.0	1.92	$H_{1/3}$ (cm)	8.76	18.25	13.97	20.01	18.02	17.52	17.00						
		$T_{1/3}$ (s)	2.54	2.06	1.80	2.01	1.98	1.97	1.92						
		$T_{1/3}$ (s)	1.98	-0.36	-0.15	0.11	0.11	0.10	-						
17.6	1.94	$H_{1/3}$ (cm)	9.38	19.40	14.25	20.80	18.44	18.27	17.55						
		$T_{1/3}$ (s)	2.57	2.17	1.89	2.09	1.99	2.03	1.94						
		$T_{1/3}$ (s)	2.10	-0.39	-0.26	0.12	0.08	0.10	-						
18.0	1.97	$H_{1/3}$ (cm)	9.58	19.08	14.23	20.68	18.47	18.44	17.96						
		$T_{1/3}$ (s)	2.51	2.13	1.91	2.09	2.00	2.04	1.97						
		$T_{1/3}$ (s)	2.10	-0.41	-0.25	0.10	0.04	0.09	-						





Appendix 3(2). 伝達波実験結果 (CASE1, 不規則波実験)

水路床での入射波	反射率	$K_s$	$H_0'$ (cm)	波高比	堤体位置波高 (cm)	伝達波高 $H_{1/3,i}$ (cm)		波高伝達率 $K_t = H_{1/3,i}/H_i$		相対天 端高 $R/H_i$	波高伝達率 $K_t = \sqrt{E_i/E_i}$	
						堤体後面壁から 62.5	362.5	堤体後面壁から 62.5	362.5		堤体後面壁から 62.5	162.5
$H_{max}$ (cm) 23.97						0.44	0.50	0.52				
$H_{1/10}$ (cm) 18.32	0.258	0.919	15.29	-	-	0.38	0.35	0.40		-	-	-
$H_{1/3}$ (cm) 14.05						0.29	0.27	0.30				
$T_{1/3}$ (s) 1.84						5.66	6.90	3.41				
$H_{max}$ (cm) 25.69						0.83	0.50	0.67				
$H_{1/10}$ (cm) 20.35	0.270		16.85		18.97	0.46	0.36	0.47		1.07	0.030	0.029
$H_{1/3}$ (cm) 15.42						0.28	0.25	0.36	0.015	0.013	0.019	
$T_{1/3}$ (s) 1.84		0.915		1.23		4.81	4.70	4.11				
$H_{max}$ (cm) 26.06						0.74	0.53	0.50				
$H_{1/10}$ (cm) 20.32	0.270		16.96		19.09	0.48	0.44	0.41		1.06	0.025	0.024
$H_{1/3}$ (cm) 15.52						0.33	0.33	0.29	0.017	0.017	0.015	0.028
$T_{1/3}$ (s) 1.82						4.75	4.82	3.15				
$H_{max}$ (cm) 24.19						1.15	0.50	0.55				
$H_{1/10}$ (cm) 21.16	0.256		18.20		19.57	0.58	0.33	0.42	0.020	0.013	0.015	0.029
$H_{1/3}$ (cm) 16.73						0.40	0.25	0.30				
$T_{1/3}$ (s) 1.81		0.919		1.17		3.94	3.28	2.57				
$H_{max}$ (cm) 24.73						1.37	0.53	0.64				
$H_{1/10}$ (cm) 21.10	0.253		18.24		19.61	0.61	0.37	0.48	0.020	0.015	0.018	0.030
$H_{1/3}$ (cm) 16.76						0.39	0.30	0.36				
$T_{1/3}$ (s) 1.83						3.04	4.74	3.03				
$H_{max}$ (cm) 27.07						1.67	0.74	0.83				
$H_{1/10}$ (cm) 22.31	0.266	0.919	18.22	-	-	0.90	0.57	0.55	0.020	0.015	0.018	0.027
$H_{1/3}$ (cm) 16.74						0.57	0.39	0.41				
$T_{1/3}$ (s) 1.87						3.23	3.72	3.52				
$H_{max}$ (cm) 29.63						2.48	1.12	0.83				
$H_{1/10}$ (cm) 23.52	0.276		19.65		21.53	1.17	0.75	0.70	0.038	0.026	0.026	0.041
$H_{1/3}$ (cm) 17.94						0.82	0.56	0.57				
$T_{1/3}$ (s) 1.97		0.913		1.20		2.67	3.94	4.26				
$H_{max}$ (cm) 29.92						2.09	1.03	0.78				
$H_{1/10}$ (cm) 23.50	0.275		19.49		21.35	1.23	0.73	0.69	0.041	0.024	0.026	0.038
$H_{1/3}$ (cm) 17.79						0.87	0.52	0.55				
$T_{1/3}$ (s) 1.97						2.56	3.94	4.03				

Appendix 4(1) . 波圧実験結果 (CASE1, 直立堤設置水深2.3cm)

波種	水路床での入射波諸元			Ks	H' (cm)	波高比	堤体位置波高 (cm)	波圧強度 P (N/cm <sup>2</sup> )						波力 F (N/cm)	無次元波圧強度 p/wH						無次元断面平均波圧強度											
	H <sub>max</sub>	H <sub>1/10</sub>	H <sub>1/3</sub>					T <sub>max</sub>	T <sub>1/10</sub>	T <sub>1/3</sub>	計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0				計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0			2.0	9.0	17.0		21.0	25.0	33.0	41.5	2.0	9.0	17.0	21.0	25.0	33.0	41.5
											P <sub>max</sub>	P <sub>1/10</sub>	P <sub>1/3</sub>		P <sub>max</sub>	P <sub>1/10</sub>	P <sub>1/3</sub>															
不規則波	26.14	20.52	15.63	2.20	1.82	1.85	19.22	1.36	0.136	0.130	0.140	0.130	0.161	0.083	0.047	4.98	0.72	0.69	0.74	0.69	0.85	0.44	0.25	0.51								
	20.52	15.63	1.85	1.82	1.85	19.22	0.105	0.098	0.106	0.096	0.087	0.043	0.017	3.29	0.56	0.52	0.56	0.51	0.46	0.23	0.09	0.33										
	15.63	1.85	1.82	1.85	1.82	19.22	0.079	0.072	0.079	0.072	0.053	0.018	0.009	2.25	0.42	0.38	0.42	0.38	0.28	0.09	0.05	0.23										
作用波	25.19	20.38	15.61	1.98	1.78	1.83	19.20	0.147	0.132	0.151	0.153	0.234	0.066	0.033	5.44	0.78	0.70	0.80	0.81	1.24	0.35	0.18	0.55									
	20.38	15.61	1.83	1.78	1.83	19.20	0.097	0.093	0.103	0.097	0.105	0.034	0.011	3.20	0.52	0.49	0.55	0.51	0.56	0.18	0.06	0.33										
	15.61	1.83	1.83	1.78	1.83	19.20	0.072	0.069	0.078	0.071	0.057	0.014	0.005	2.15	0.38	0.37	0.41	0.38	0.30	0.07	0.03	0.22										
作用波の同時性を考慮せず	26.31	21.61	16.91	1.60	1.82	1.82	19.78	0.174	0.174	0.219	0.250	0.759	0.273	0.285	12.88	0.89	0.90	1.13	1.29	3.91	1.41	1.47	1.27									
	21.61	16.91	1.82	1.82	1.82	19.78	0.126	0.119	0.133	0.122	0.157	0.140	0.017	5.23	0.65	0.61	0.68	0.63	0.81	0.72	0.26	0.52										
	16.91	1.82	1.82	1.82	1.82	19.78	0.094	0.084	0.093	0.086	0.080	0.049	0.017	3.02	0.49	0.43	0.48	0.44	0.41	0.25	0.09	0.30										
の同時性を考慮せず	25.41	21.57	16.85	2.04	1.86	1.85	19.71	0.187	0.183	0.201	0.183	0.218	0.260	0.043	8.01	0.97	0.94	1.04	0.95	1.13	1.35	0.22	0.80									
	21.57	16.85	1.85	2.04	1.86	19.71	0.123	0.119	0.132	0.120	0.114	0.082	0.018	4.30	0.63	0.62	0.68	0.62	0.59	0.42	0.10	0.43										
	16.85	1.85	1.85	2.04	1.86	19.71	0.088	0.081	0.090	0.082	0.066	0.029	0.008	2.64	0.46	0.42	0.47	0.43	0.34	0.15	0.04	0.26										
を考慮せず	28.89	23.74	18.19	2.28	2.11	1.99	21.83	0.259	0.259	0.325	0.353	0.561	0.455	1.003	19.12	1.21	1.21	1.52	1.65	2.62	2.13	4.68	1.72									
	23.74	18.19	2.11	2.28	2.11	21.83	0.147	0.143	0.166	0.165	0.197	0.138	0.111	6.44	0.69	0.67	0.78	0.77	0.92	0.65	0.52	0.58										
	18.19	2.11	2.11	2.28	2.11	21.83	0.102	0.096	0.108	0.103	0.097	0.051	0.036	3.53	0.48	0.45	0.51	0.48	0.45	0.24	0.17	0.32										
を考慮せず	29.28	23.60	18.00	2.32	2.07	1.97	21.60	0.253	0.229	0.319	0.282	0.311	0.645	0.324	15.04	1.19	1.08	1.51	1.33	1.47	3.05	1.53	1.36									
	23.60	18.00	2.07	2.32	2.07	21.60	0.144	0.135	0.157	0.160	0.146	0.182	0.049	6.02	0.68	0.64	0.74	0.75	0.69	0.86	0.23	0.55										
	18.00	2.07	2.07	2.32	2.07	21.60	0.093	0.089	0.102	0.099	0.079	0.062	0.017	3.27	0.44	0.42	0.48	0.47	0.37	0.29	0.08	0.30										
不規則波	26.14	20.52	15.63	2.20	1.82	1.85	19.22	0.130	0.130	0.136	0.120	0.089	0.039	0.000	3.85	0.69	0.69	0.72	0.63	0.47	0.21	0.00	0.39									
	20.52	15.63	1.85	2.20	1.82	19.22	0.090	0.089	0.098	0.088	0.067	0.015	0.002	2.63	0.48	0.47	0.52	0.46	0.35	0.08	0.01	0.27										
	15.63	1.85	1.85	2.20	1.82	19.22	0.072	0.068	0.076	0.069	0.044	0.009	0.003	1.99	0.38	0.36	0.40	0.37	0.23	0.05	0.01	0.20										
作用波の同時性を考慮	25.19	20.38	15.61	1.98	1.78	1.83	19.20	0.129	0.121	0.140	0.129	0.180	0.000	0.000	4.05	0.68	0.64	0.74	0.68	0.96	0.00	0.00	0.41									
	20.38	15.61	1.83	1.98	1.78	19.20	0.088	0.085	0.096	0.088	0.075	0.014	0.001	2.62	0.47	0.45	0.51	0.47	0.40	0.07	0.01	0.27										
	15.61	1.83	1.83	1.98	1.78	19.20	0.068	0.067	0.076	0.069	0.047	0.005	0.001	1.94	0.36	0.36	0.40	0.37	0.25	0.03	0.00	0.20										
作用波の同時性を考慮	26.31	21.61	16.91	1.60	1.82	1.82	19.78	0.139	0.135	0.158	0.217	0.759	0.042	0.000	8.49	0.72	0.70	0.81	1.12	3.91	1.41	1.47	1.27									
	21.61	16.91	1.82	1.60	1.82	19.78	0.103	0.100	0.116	0.111	0.123	0.083	0.001	3.88	0.53	0.52	0.60	0.57	0.63	0.43	0.01	0.38										
	16.91	1.82	1.82	1.60	1.82	19.78	0.081	0.077	0.087	0.081	0.071	0.028	0.000	2.54	0.42	0.40	0.45	0.42	0.37	0.15	0.00	0.25										
作用波の同時性を考慮	25.41	21.57	16.85	2.04	1.86	1.85	19.71	0.162	0.166	0.195	0.183	0.159	0.260	0.000	7.13	0.84	0.86	1.01	0.95	0.82	1.35	0.00	0.71									
	21.57	16.85	1.85	2.04	1.86	19.71	0.113	0.111	0.126	0.115	0.087	0.067	0.001	3.75	0.59	0.57	0.65	0.59	0.45	0.35	0.01	0.37										
	16.85	1.85	1.85	2.04	1.86	19.71	0.082	0.079	0.089	0.081	0.055	0.022	0.001	2.40	0.42	0.41	0.46	0.42	0.28	0.11	0.00	0.24										
作用波の同時性を考慮	28.89	23.74	18.19	2.28	2.11	1.99	21.83	0.240	0.249	0.325	0.273	0.247	0.050	0.003	8.14	1.12	1.16	1.52	1.28	1.15	2.23	0.02	0.73									
	23.74	18.19	2.11	2.28	2.11	21.83	0.123	0.121	0.139	0.123	0.112	0.071	0.081	4.59	0.57	0.56	0.65	0.58	0.52	0.33	0.38	0.41										
	18.19	2.11	2.11	2.28	2.11	21.83	0.094	0.092	0.103	0.093	0.070	0.027	0.025	2.97	0.44	0.43	0.48	0.43	0.33	0.13	0.12	0.27										
規則波	29.28	23.60	18.00	2.32	2.07	1.97	21.60	0.210	0.191	0.221	0.069	0.226	0.480	0.010	9.56	0.99	0.90	1.04	0.32	1.07	2.27	0.05	0.87									
	23.60	18.00	2.07	2.32	2.07	21.60	0.128	0.117	0.133	0.107	0.100	0.133	0.004	4.53	0.61	0.55	0.63	0.51	0.47	0.63	0.02	0.41										
	18.00	2.07	2.07	2.32	2.07	21.60	0.088	0.086	0.096	0.083	0.061	0.043	0.002	2.77	0.42	0.41	0.45	0.39	0.29	0.20	0.01	0.25										
規則波	16.30	16.32	1.77	1.77	1.76	17.76	0.091	0.090	0.102	0.104	0.089	0.082	0.004	3.44	0.45	0.44	0.50	0.51	0.44	0.41	0.02	0.33										
	16.32	1.77	1.77	1.77	1.76	17.76	0.090	0.085	0.094	0.094	0.077	0.035	0.001	2.83	0.44	0.42	0.46	0.46	0.38	0.17	0.01	0.27										
	1.77	1.77	1.76	1.77	1.76	17.76	0.126	0.123	0.141	0.140	0.113	0.138	0.016	4.89	0.58	0.56	0.65	0.64	0.52	0.63	0.04	0.43										
規則波	20.01	20.01	1.76	1.76	1.76	21.80	0.141	0.124	0.137	0.135	0.132	0.114	0.016	4.88	0.63	0.55	0.61	0.60	0.59	0.51	0.07	0.42										
	20.01	1.76	1.76	1.76	1.76	21.80	0.191	0.183	0.218	0.220	0.222	0.266	0.043	8.37	0.86	0.83	0.98	0.99	1.00	1.20	0.19	0.73										
	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	21.80	0.196	0.170	0.197	0.199	0.168	0.266	0.125	8.18	0.88	0.77	0.89	0.89	0.76	1.20	0.56	0.71										
規則波	29.78	29.78	1.76	1.76	1.76	32.44	0.219	0.181	0.204	0.207	0.201	0.252	0.266	9.30	0.95	0.78	0.88	0.90	0.87	1.09	1.15	0.78										
	29.78	1.76	1.76	1.76	1.76	32.44	0.214	0.179	0.197	0.191	0.171	0.254	0.105	8.14	0.92	0.77	0.85	0.83	0.74	1.09	1.15	0.78										
	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	32.44	0.214	0.179	0.197	0.191	0.171	0.254	0.105	8.14	0.92	0.77	0.85	0.83	0.74	1.09	1.15	0.78										

Appendix 4(2) . 波圧実験結果 (CASE1, 直立堤設置水深21.0cm)

波種	水路床での入射波諸元			Ks	H' (cm)	波高比	堤体位置波高 (cm)	波圧強度 p (N/cm <sup>2</sup> )						波力 F (N/cm)	無次元波圧強度 p/wH						無次元断面平均波圧強度				
	波高 (cm)							計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0							計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0										
	H <sub>max</sub>	H <sub>1/10</sub>	H <sub>1/3</sub>					2.0	9.0	17.0	21.0	25.0	33.0		41.5	2.0	9.0	17.0	21.0	25.0		33.0	41.5		
不規則波 (作用波圧の同時性を考慮せず)	H <sub>max</sub>	23.24	T <sub>max</sub>	1.82	16.57	1.23	18.65	p <sub>max</sub>	0.116	0.115	0.128	0.372	0.080	0.160	0.006	5.59	0.63	0.63	0.70	2.03	0.43	0.88	0.03	0.59	
	H <sub>1/10</sub>	19.39	T <sub>1/10</sub>	1.80				p <sub>1/10</sub>	0.094	0.084	0.093	0.108	0.054	0.025	0.005	2.70	0.51	0.46	0.51	0.59	0.30	0.14	0.03	0.28	0.28
	H <sub>1/3</sub>	15.16	T <sub>1/3</sub>	1.79				p <sub>1/3</sub>	0.072	0.065	0.072	0.074	0.034	0.010	0.005	1.92	0.39	0.35	0.40	0.41	0.18	0.05	0.03	0.20	0.20
	H <sub>max</sub>	23.42	T <sub>max</sub>	1.82	16.67	1.23	18.76	p <sub>max</sub>	0.121	0.119	0.131	0.118	0.119	0.205	0.092	5.69	0.66	0.64	0.71	0.64	0.65	1.11	0.50	0.59	
	H <sub>1/10</sub>	19.59	T <sub>1/10</sub>	1.81				p <sub>1/10</sub>	0.085	0.083	0.092	0.086	0.053	0.041	0.014	2.70	0.46	0.45	0.50	0.46	0.29	0.22	0.07	0.28	
	H <sub>1/3</sub>	15.25	T <sub>1/3</sub>	1.79				p <sub>1/3</sub>	0.064	0.063	0.070	0.066	0.032	0.015	0.007	1.85	0.35	0.34	0.38	0.36	0.17	0.08	0.04	0.19	
	H <sub>max</sub>	23.96	T <sub>max</sub>	1.56	18.26	1.17	19.63	p <sub>max</sub>	0.141	0.143	0.159	0.182	0.183	0.163	0.027	6.12	0.73	0.75	0.83	0.94	0.95	0.85	1.14	0.61	
	H <sub>1/10</sub>	20.55	T <sub>1/10</sub>	1.87				p <sub>1/10</sub>	0.114	0.107	0.119	0.115	0.110	0.066	0.009	3.86	0.59	0.56	0.62	0.60	0.57	0.34	0.05	0.38	
	H <sub>1/3</sub>	16.78	T <sub>1/3</sub>	1.83				p <sub>1/3</sub>	0.089	0.078	0.087	0.082	0.057	0.023	0.006	2.49	0.46	0.40	0.45	0.43	0.30	0.12	0.03	0.25	
	H <sub>max</sub>	24.94	T <sub>max</sub>	1.46	18.25	1.17	19.62	p <sub>max</sub>	0.169	0.169	0.203	0.174	0.228	0.816	0.215	13.35	0.88	0.88	1.06	0.91	1.19	4.24	1.12	1.33	
	H <sub>1/10</sub>	20.73	T <sub>1/10</sub>	1.78				p <sub>1/10</sub>	0.123	0.117	0.134	0.127	0.116	0.172	0.039	5.18	0.64	0.61	0.70	0.66	0.60	0.89	0.20	0.52	
	H <sub>1/3</sub>	16.77	T <sub>1/3</sub>	1.82				p <sub>1/3</sub>	0.089	0.082	0.092	0.087	0.059	0.055	0.015	2.89	0.46	0.42	0.48	0.45	0.31	0.29	0.08	0.29	
	H <sub>max</sub>	26.92	T <sub>max</sub>	2.32	18.97	1.20	20.78	p <sub>max</sub>	0.231	0.218	0.269	0.330	0.507	0.369	0.608	15.12	1.13	1.07	1.32	1.62	2.49	1.81	2.98	1.43	
	H <sub>1/10</sub>	22.55	T <sub>1/10</sub>	2.04				p <sub>1/10</sub>	0.142	0.138	0.152	0.165	0.196	0.116	0.083	5.96	0.70	0.68	0.74	0.81	0.96	0.57	0.41	0.56	
	H <sub>1/3</sub>	17.32	T <sub>1/3</sub>	1.93				p <sub>1/3</sub>	0.098	0.091	0.101	0.102	0.089	0.042	0.028	3.25	0.48	0.45	0.49	0.50	0.44	0.21	0.14	0.31	
H <sub>max</sub>	26.97	T <sub>max</sub>	2.34	19.07	1.20	20.89	p <sub>max</sub>	0.238	0.225	0.383	0.314	0.304	0.365	0.118	12.01	1.16	1.10	1.87	1.53	1.49	1.78	0.58	1.13		
H <sub>1/10</sub>	22.65	T <sub>1/10</sub>	2.08				p <sub>1/10</sub>	0.138	0.131	0.160	0.162	0.144	0.072	0.023	4.92	0.67	0.64	0.78	0.79	0.70	0.35	0.11	0.46		
H <sub>1/3</sub>	17.41	T <sub>1/3</sub>	1.91				p <sub>1/3</sub>	0.092	0.087	0.101	0.100	0.072	0.027	0.010	2.86	0.45	0.42	0.49	0.49	0.35	0.13	0.05	0.27		
H <sub>max</sub>	23.24	T <sub>max</sub>	1.82	16.57	1.23	18.65	p <sub>max</sub>	0.109	0.111	0.125	0.113	0.072	0.011	0.000	3.16	0.60	0.61	0.68	0.62	0.40	0.06	0.00	0.33		
H <sub>1/10</sub>	19.39	T <sub>1/10</sub>	1.80				p <sub>1/10</sub>	0.078	0.077	0.085	0.100	0.041	0.002	0.001	2.19	0.43	0.42	0.46	0.55	0.23	0.01	0.01	0.23		
H <sub>1/3</sub>	15.16	T <sub>1/3</sub>	1.79				p <sub>1/3</sub>	0.064	0.062	0.069	0.070	0.027	0.002	0.001	1.69	0.35	0.34	0.37	0.38	0.15	0.01	0.01	0.18		
H <sub>max</sub>	23.42	T <sub>max</sub>	1.82	16.67	1.23	18.76	p <sub>max</sub>	0.114	0.112	0.125	0.115	0.072	0.020	0.000	3.27	0.62	0.61	0.68	0.63	0.39	0.11	0.01	0.34		
H <sub>1/10</sub>	19.59	T <sub>1/10</sub>	1.81				p <sub>1/10</sub>	0.075	0.076	0.085	0.078	0.040	0.014	0.001	2.16	0.41	0.41	0.46	0.42	0.22	0.08	0.01	0.23		
H <sub>1/3</sub>	15.25	T <sub>1/3</sub>	1.79				p <sub>1/3</sub>	0.061	0.062	0.069	0.063	0.027	0.005	0.001	1.67	0.33	0.34	0.38	0.34	0.14	0.03	0.01	0.17		
H <sub>max</sub>	23.96	T <sub>max</sub>	1.56	18.26	1.17	19.63	p <sub>max</sub>	0.121	0.122	0.147	0.132	0.102	0.141	0.002	4.78	0.63	0.64	0.76	0.69	0.53	0.73	0.01	0.48		
H <sub>1/10</sub>	20.55	T <sub>1/10</sub>	1.87				p <sub>1/10</sub>	0.095	0.095	0.108	0.104	0.080	0.041	0.001	3.13	0.49	0.49	0.56	0.54	0.42	0.22	0.01	0.31		
H <sub>1/3</sub>	16.78	T <sub>1/3</sub>	1.83				p <sub>1/3</sub>	0.077	0.072	0.081	0.076	0.044	0.017	0.001	2.16	0.40	0.37	0.42	0.39	0.23	0.09	0.01	0.22		
H <sub>max</sub>	24.94	T <sub>max</sub>	1.46	18.25	1.17	19.62	p <sub>max</sub>	0.076	0.077	0.083	0.062	0.014	0.816	0.032	8.73	0.40	0.40	0.43	0.32	0.07	4.24	0.17	0.87		
H <sub>1/10</sub>	20.73	T <sub>1/10</sub>	1.78				p <sub>1/10</sub>	0.099	0.098	0.114	0.102	0.081	0.145	0.005	4.08	0.52	0.51	0.59	0.53	0.42	0.75	0.03	0.41		
H <sub>1/3</sub>	16.77	T <sub>1/3</sub>	1.82				p <sub>1/3</sub>	0.079	0.075	0.086	0.078	0.047	0.044	0.002	2.48	0.41	0.39	0.45	0.41	0.24	0.23	0.01	0.25		
H <sub>max</sub>	26.92	T <sub>max</sub>	2.32	18.97	1.20	20.78	p <sub>max</sub>	0.172	0.171	0.163	0.159	0.117	0.369	0.010	7.64	0.85	0.84	0.80	0.78	0.57	1.81	0.05	0.72		
H <sub>1/10</sub>	22.55	T <sub>1/10</sub>	2.04				p <sub>1/10</sub>	0.104	0.106	0.121	0.136	0.125	0.049	0.029	3.94	0.51	0.52	0.59	0.67	0.61	0.24	0.14	0.37		
H <sub>1/3</sub>	17.32	T <sub>1/3</sub>	1.93				p <sub>1/3</sub>	0.082	0.081	0.091	0.091	0.065	0.020	0.009	2.57	0.40	0.40	0.45	0.45	0.32	0.10	0.05	0.24		
H <sub>max</sub>	26.97	T <sub>max</sub>	2.34	19.07	1.20	20.89	p <sub>max</sub>	0.208	0.196	0.383	0.192	0.206	0.039	0.000	7.23	1.01	0.96	1.87	0.93	1.01	0.19	0.00	0.68		
H <sub>1/10</sub>	22.65	T <sub>1/10</sub>	2.08				p <sub>1/10</sub>	0.132	0.125	0.154	0.118	0.105	0.020	0.000	3.85	0.65	0.61	0.75	0.57	0.51	0.10	0.00	0.36		
H <sub>1/3</sub>	17.41	T <sub>1/3</sub>	1.93				p <sub>1/3</sub>	0.089	0.086	0.101	0.087	0.055	0.007	0.001	2.48	0.43	0.42	0.49	0.42	0.27	0.03	0.00	0.23		
H	16.33	T	1.77	17.79	1.27	20.74	p	0.078	0.076	0.084	0.078	0.045	0.018	0.006	2.26	0.39	0.37	0.41	0.38	0.22	0.09	0.03	0.21		
H	16.39	T	1.77				p	0.072	0.074	0.083	0.076	0.040	0.006	0.007	2.08	0.35	0.36	0.41	0.37	0.20	0.03	0.03	0.20		
H	21.50	T	1.79				p	0.122	0.109	0.117	0.106	0.099	0.030	0.026	3.59	0.51	0.45	0.49	0.44	0.41	0.13	0.11	0.29		
H	19.52	T	1.77	18.26	1.14	22.25	p	0.102	0.100	0.108	0.098	0.070	0.029	0.014	3.09	0.47	0.46	0.50	0.45	0.32	0.13	0.07	0.27		
H	26.06	T	1.77				p	0.171	0.150	0.173	0.174	0.177	0.309	0.277	8.86	0.78	0.68	0.79	0.79	0.81	1.40	1.26	0.78		
H	26.22	T	1.77				p	0.164	0.145	0.163	0.156	0.136	0.175	0.201	6.91	0.74	0.66	0.74	0.70	0.62	0.79	0.91	0.60		
H	29.86	T	1.76	32.53	0.79	23.59	p	0.203	0.191	0.220	0.212	0.205	0.502	0.181	11.04	0.88	0.83	0.95	0.92	0.89	2.17	0.78	0.92		
H	29.57	T	1.75				p	0.211	0.180	0.204	0.197	0.193	0.353	0.143	9.35	0.92	0.79	0.89	0.86	0.84	1.54	0.62	0.79		

Appendix 4(3). 波圧実験結果 (CASE2, 直立堤設置水深20.5cm)

波種	水路床での入射波諸元			Ks	H' (cm)	波高比	堤体位置波高 (cm)	波圧強度 p (N/cm <sup>2</sup> )						波力 F (N/cm)	無次元波圧強度 p/wH						無次元断面平均波圧強度			
	波高 (cm)							計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0							計測位置 z (cm), 直立堤底面 z=0									
	H <sub>max</sub>	H <sub>1/10</sub>	H <sub>1/3</sub>					2.0	9.0	17.0	21.0	25.0	33.0		41.5	2.0	9.0	17.0	21.0	25.0		33.0	41.5	
不規則波 (作用波圧の同時性を考慮せず)	H <sub>max</sub>	23.91	T <sub>max</sub>	2.06	16.52	1.18	17.82	p <sub>max</sub>	0.129	0.100	0.100	0.101	0.074	0.031	0.007	2.96	0.74	0.57	0.57	0.58	0.42	0.18	0.04	0.32
	H <sub>1/10</sub>	19.56	T <sub>1/10</sub>	1.80				p <sub>1/10</sub>	0.091	0.075	0.077	0.076	0.050	0.009	0.006	2.07	0.52	0.43	0.44	0.44	0.28	0.05	0.03	0.23
	H <sub>1/3</sub>	15.10	T <sub>1/3</sub>	1.81				p <sub>1/3</sub>	0.070	0.061	0.061	0.061	0.035	0.006	0.005	1.62	0.40	0.35	0.35	0.35	0.20	0.03	0.03	0.18
	H <sub>max</sub>	22.62	T <sub>max</sub>	2.16	16.32	1.16	17.61	p <sub>max</sub>	0.118	0.115	0.118	0.124	0.119	0.050	0.008	3.64	0.68	0.67	0.69	0.72	0.69	0.29	0.05	0.40
	H <sub>1/10</sub>	19.47	T <sub>1/10</sub>	1.93				p <sub>1/10</sub>	0.092	0.080	0.081	0.083	0.062	0.011	0.005	2.24	0.53	0.46	0.47	0.48	0.36	0.06	0.03	0.25
	H <sub>1/3</sub>	14.92	T <sub>1/3</sub>	1.82				p <sub>1/3</sub>	0.068	0.060	0.062	0.064	0.038	0.006	0.004	1.62	0.40	0.35	0.36	0.37	0.22	0.03	0.02	0.18
	H <sub>max</sub>	24.00	T <sub>max</sub>	1.52	18.25	1.16	19.43	p <sub>max</sub>	0.133	0.132	0.142	0.180	0.176	0.357	0.025	6.88	0.70	0.69	0.75	0.95	0.92	1.87	0.13	0.69
	H <sub>1/10</sub>	21.05	T <sub>1/10</sub>	1.88				p <sub>1/10</sub>	0.099	0.094	0.098	0.106	0.096	0.055	0.007	3.11	0.52	0.50	0.52	0.56	0.50	0.29	0.04	0.31
	H <sub>1/3</sub>	16.75	T <sub>1/3</sub>	1.86				p <sub>1/3</sub>	0.075	0.070	0.073	0.075	0.053	0.019	0.005	2.03	0.40	0.37	0.38	0.40	0.28	0.10	0.02	0.20
	H <sub>max</sub>	25.76	T <sub>max</sub>	1.46	18.31	1.20	20.87	p <sub>max</sub>	0.158	0.148	0.159	0.183	0.316	0.213	0.031	7.00	0.82	0.77	0.83	0.95	1.65	1.11	0.16	0.70
	H <sub>1/10</sub>	21.32	T <sub>1/10</sub>	1.87				p <sub>1/10</sub>	0.103	0.097	0.100	0.100	0.121	0.045	0.008	3.21	0.54	0.51	0.52	0.52	0.63	0.24	0.04	0.32
	H <sub>1/3</sub>	16.81	T <sub>1/3</sub>	1.85				p <sub>1/3</sub>	0.078	0.071	0.073	0.073	0.061	0.017	0.005	2.08	0.41	0.37	0.38	0.38	0.32	0.09	0.03	0.21
H <sub>max</sub>	26.80	T <sub>max</sub>	2.34	19.05	1.18	20.75	p <sub>max</sub>	0.187	0.186	0.212	0.320	0.569	0.351	0.158	11.37	0.91	0.91	1.03	1.56	2.78	1.72	0.77	1.07	
H <sub>1/10</sub>	22.38	T <sub>1/10</sub>	2.10				p <sub>1/10</sub>	0.131	0.120	0.126	0.145	0.166	0.084	0.026	4.47	0.64	0.59	0.61	0.71	0.81	0.41	0.13	0.42	
H <sub>1/3</sub>	17.39	T <sub>1/3</sub>	1.94				p <sub>1/3</sub>	0.095	0.082	0.085	0.091	0.080	0.031	0.012	2.62	0.46	0.40	0.42	0.45	0.39	0.15	0.06	0.25	
H <sub>max</sub>	26.80	T <sub>max</sub>	2.34	18.94	1.18	20.75	p <sub>max</sub>	0.179	0.186	0.194	0.202	0.287	0.277	0.167	12.52	0.88	0.92	0.96	0.99	1.41	1.36	5.24	1.18	
H <sub>1/10</sub>	22.29	T <sub>1/10</sub>	2.04				p <sub>1/10</sub>	0.126	0.116	0.117	0.122	0.141	0.065	0.117	4.38	0.62	0.57	0.57	0.60	0.69	0.32	0.58	0.41	
H <sub>1/3</sub>	17.29	T <sub>1/3</sub>	1.96				p <sub>1/3</sub>	0.092	0.080	0.081	0.085	0.071	0.023	0.038	2.55	0.45	0.39	0.40	0.42	0.35	0.11	0.19	0.24	
H <sub>max</sub>	23.91	T <sub>max</sub>	2.06	16.52	1.18	17.82	p <sub>max</sub>	0.100	0.099	0.099	0.094	0.064	0.002	0.001	2.50	0.57	0.56	0.57	0.54	0.37	0.01	0.01	0.27	
H <sub>1/10</sub>	19.56	T <sub>1/10</sub>	1.80				p <sub>1/10</sub>	0.075	0.071	0.073	0.072	0.045	0.003	0.002	1.84	0.43	0.41	0.42	0.41	0.26	0.01	0.01	0.20	
H <sub>1/3</sub>	15.10	T <sub>1/3</sub>	1.81				p <sub>1/3</sub>	0.063	0.058	0.059	0.059	0.032	0.003	0.002	1.48	0.36	0.33	0.34	0.34	0.18	0.01	0.01	0.16	
H <sub>max</sub>	24.00	T <sub>max</sub>	1.52	18.25	1.16	19.43	p <sub>max</sub>	0.154	0.140	0.173	0.181	0.156	0.260	0.004	6.29	0.89	0.81	1.00	1.05	0.91	1.50	0.03	0.70	
H <sub>1/10</sub>	21.05	T <sub>1/10</sub>	1.88				p <sub>1/10</sub>	0.094	0.088	0.108	0.113	0.091	0.060	0.001	3.11	0.54	0.51	0.63	0.65	0.53	0.35	0.00	0.35	
H <sub>1/3</sub>	16.75	T <sub>1/3</sub>	1.86				p <sub>1/3</sub>	0.072	0.070	0.083	0.082	0.056	0.020	0.001	2.12	0.42	0.40	0.48	0.48	0.33	0.12	0.01	0.23	
H <sub>max</sub>	25.76	T <sub>max</sub>	1.46	18.31	1.16	19.50	p <sub>max</sub>	0.121	0.113	0.133	0.148	0.176	0.000	0.000	3.76	0.63	0.59	0.70	0.78	0.92	0.00	0.00	0.38	
H <sub>1/10</sub>	21.05	T <sub>1/10</sub>	1.88				p <sub>1/10</sub>	0.086	0.083	0.087	0.092	0.070	0.030	0.001	2.49	0.45	0.44	0.46	0.48	0.37	0.16	0.00	0.25	
H <sub>1/3</sub>	16.75	T <sub>1/3</sub>	1.86				p <sub>1/3</sub>	0.069	0.066	0.068	0.070	0.043	0.010	0.001	1.78	0.36	0.34	0.36	0.37	0.23	0.05	0.00	0.18	
H <sub>max</sub>	25.76	T <sub>max</sub>	1.46	18.31	1.16	19.50	p <sub>max</sub>	0.138	0.127	0.134	0.142	0.122	0.123	0.000	4.50	0.72	0.66	0.70	0.74	0.64	0.64	0.00	0.45	
H <sub>1/10</sub>	21.32	T <sub>1/10</sub>	1.87				p <sub>1/10</sub>	0.089	0.086	0.087	0.086	0.080	0.019	0.001	2.48	0.46	0.45	0.46	0.45	0.42	0.10	0.01	0.25	
H <sub>1/3</sub>	16.81	T <sub>1/3</sub>	1.85				p <sub>1/3</sub>	0.079	0.073	0.075	0.076	0.053	0.014	0.000	2.02	0.39	0.36	0.37	0.38	0.26	0.07	0.00	0.19	
H <sub>max</sub>	26.80	T <sub>max</sub>	2.34	17.48	1.31	21.04	p <sub>max</sub>	0.079	0.069	0.071	0.072	0.046	0.005	0.005	1.88	0.38	0.33	0.35	0.35	0.22	0.03	0.03	0.18	
H <sub>1/10</sub>	22.38	T <sub>1/10</sub>	2.10				p <sub>1/10</sub>	0.080	0.071	0.073	0.075	0.048	0.003	0.003	1.90	0.38	0.34	0.35	0.36	0.23	0.01	0.01	0.18	
H <sub>1/3</sub>	17.39	T <sub>1/3</sub>	1.94				p <sub>1/3</sub>	0.116	0.101	0.100	0.099	0.079	0.027	0.008	2.91	0.53	0.46	0.46	0.45	0.36	0.12	0.04	0.26	
H <sub>max</sub>	26.80	T <sub>max</sub>	2.34	21.85	1.08	20.69	p <sub>max</sub>	0.139	0.137	0.155	0.142	0.066	0.277	0.000	5.50	0.68	0.68	0.76	0.70	0.32	1.36	0.00	0.52	
H <sub>1/10</sub>	22.29	T <sub>1/10</sub>	2.04				p <sub>1/10</sub>	0.103	0.097	0.103	0.105	0.090	0.038	0.000	2.98	0.51	0.48	0.50	0.51	0.44	0.18	0.00	0.28	
H <sub>1/3</sub>	17.29	T <sub>1/3</sub>	1.96				p <sub>1/3</sub>	0.079	0.073	0.075	0.076	0.053	0.014	0.000	2.02	0.39	0.36	0.37	0.38	0.26	0.07	0.00	0.19	
H <sub>max</sub>	16.06	T	1.77	17.61	1.08	22.24	p	0.079	0.069	0.071	0.072	0.046	0.005	0.005	1.88	0.38	0.33	0.35	0.35	0.22	0.03	0.03	0.18	
H	16.18	T	1.77				p	0.080	0.071	0.073	0.075	0.048	0.003	0.003	1.90	0.38	0.34	0.35	0.36	0.23	0.01	0.01	0.18	
H	20.59	T	1.76				p	0.116	0.101	0.100	0.099	0.079	0.027	0.008	2.91	0.53	0.46	0.46	0.45	0.36	0.12	0.04	0.26	
H <sub>max</sub>	26.80	T <sub>max</sub>	2.34	28.27	0.78	20.26	p <sub>max</sub>	0.108	0.096	0.096	0.097	0.069	0.012	0.027	2.72	0.51	0.45	0.45	0.46	0.32	0.06	0.12	0.25	
H <sub>1/10</sub>	25.98	T <sub>1/10</sub>	1.79				p <sub>1/10</sub>	0.161	0.131	0.133	0.137	0.119	0.173	0.089	5.34	0.81	0.66	0.67	0.69	0.60	0.87	0.45	0.52	
H <sub>1/3</sub>	26.03	T <sub>1/3</sub>	1.76				p <sub>1/3</sub>	0.168	0.137	0.140	0.153	0.123	0.173	0.178	5.93	0.84	0.69	0.70	0.77	0.62	0.87	0.89	0.57	
H <sub>max</sub>	30.05	T	1.76	32.70	0.61	18.33	p	0.206	0.159	0.161	0.166	0.161	0.293	0.193	7.61	1.14	0.89	0.89	0.92	0.90	1.63	1.08	0.81	
H	30.05	T	1.76				p	0.204	0.159	0.157	0.165	0.148	0.260	0.212	7.33	1.14	0.88	0.87	0.92	0.82	1.45	1.18	0.78	
H	30.05	T	1.76				p	0.204	0.159	0.157	0.165	0.148	0.260	0.212	7.33	1.14	0.88	0.87	0.92	0.82	1.45	1.18	0.78	