

急勾配地形における遊水部付き消波工を有する 堤体の越波・波圧特性について

CHARACTERISTICS OF WAVE OVERTOPPING AND PRESSURE ON UPRIGHT STRUCTURE WITH DETACHED WAVE-DISSIPATING CONCRETE BLOCKS FOR STEEP BOTTOM SLOPE

大村智宏¹・白土和幸²

Yoshihiro OHMURA and Kazuyuki SHIRATO

¹正会員 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

²国際気象海洋株式会社 銚子事業所 (〒288-0001 千葉県銚子市川口町2-6528-87)

The breakwater and revetment constructed in the wave breaking zone are normally covered with wave-dissipating concrete blocks in front of the upright structure to decrease wave overtopping, transmitted wave and to reduce wave pressure acting on the wall. There is the upright structure with detached wave-dissipating concrete blocks, which is a kind of structure described above. In general, the detached type may be more effective measures to decrease overtopping and/or transmitted wave than the covered type. The problem is that the both of overtopping rate and transmission coefficient of the detached type cannot be estimated quantitatively. Moreover the wave pressure acting on the wall is unknown for steep bottom slope. In this study, we examine the performance of the two detached type models for bottom slope of 1/10 by physical model test and numerical simulation. The volume of fluid method is employed in numerical simulation. As a result, we can obtain the rate of overtopping, transmission coefficient and water elevation in wave chamber. It is also found out that the wave pressure acting on the wall is impulsive.

Key Words : Wave overtopping, transmitted wave, pressure, upright structure with detached wave-dissipating concrete blocks, physical model test, VOF method

1. はじめに

港湾・漁港・海岸施設の整備にあたっては、荒天時における来襲波浪に対して伝達波高や越波量を一定の水準にまで低減して、係船岸や水際線背後用地の利用に支障が生じることのないように施設の設計をおこなう必要がある。その際、砕波帯に整備する防波施設としては、伝達波高、越波の低減といった施設の機能性および堤体本体へ作用する波圧・波力の低減といった耐波性の双方を満たすことを目的に、直立消波構造体や消波ブロックが用いられる。このうち後者の消波ブロックを用いる工法には、ケーソン等の本体工の前面を消波ブロックで被覆する消波ブロック被覆堤、傾斜堤、潜堤が一般的に知られているが、「遊水部付き消波工を有する堤体」が用いられることがある。この構造体は、直立堤と消波ブロック式傾斜堤を組み合わせた構造であり、2重堤ともよばれる。

本構造体の特長としては、傾斜堤を施工した後

に直立堤を施工できることから、通常の消波ブロック被覆堤と比較して施工性に優れる点があげられる。また、既設の護岸や防波堤の越波や伝達波高の低減効果を更に向上させる際の工法としても効果的である。つまり、既設の直立堤の天端を嵩上げすると端趾圧など堤体の安定性が確保できない場合や、景観への配慮から嵩上げ高に制約を受ける場合に、直立堤部分を改良することなく消波ブロックの改良によって、越波・伝達波の対策ができるからである。

関連する既往の研究としては、例えば間辺ら¹⁾や山本ら²⁾などによる検討があるものの、急勾配、大水深、高波浪条件での機能性は明らかではない。更に、耐波性能については、1/30勾配でおこなった中泉ら³⁾の波圧式があるものの、それより急勾配での波圧特性は不明である。そこで、本研究では、1/10の急勾配地形を想定して、本構造体の水理特性を明らかにすることを目的に、断面2次元水理模型実験とVOF法の数値計算を実施した。

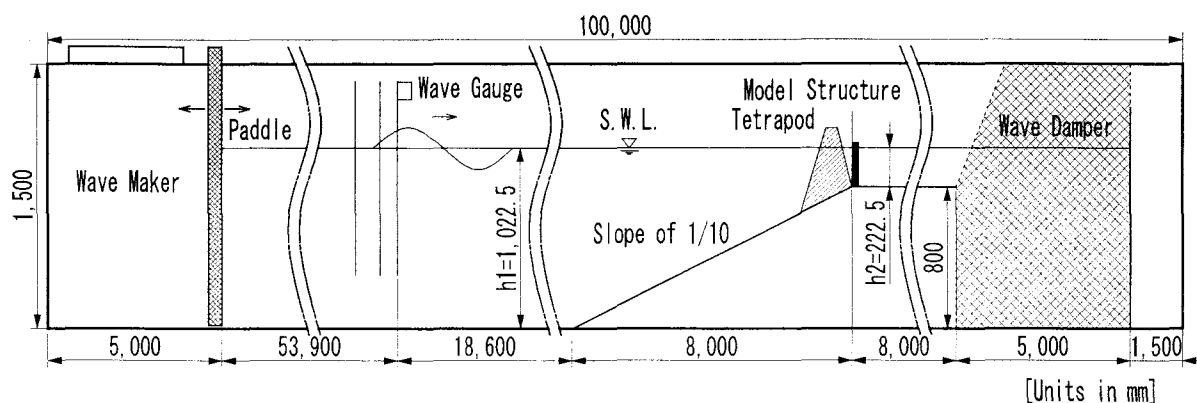


図-1 実験水槽および堤体の配置位置

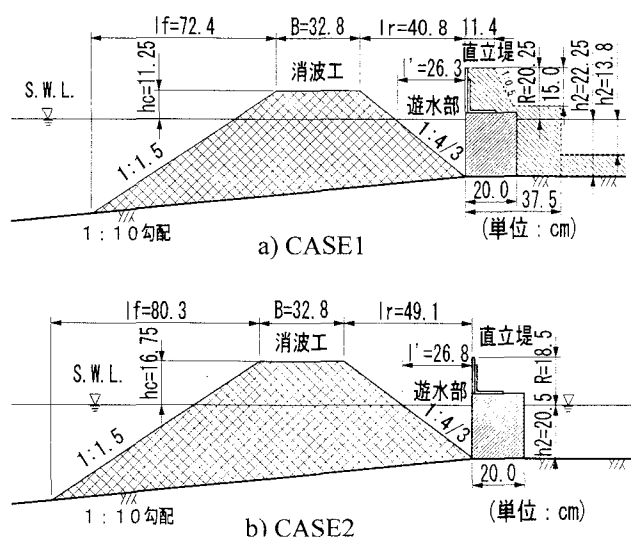


図-2 堤体の模型諸元

2. 水理模型実験の方法

(1) 実験条件

水理模型実験水槽は、図-1に示す水産工学研究所の漁港水理実験棟還流風洞付造波水路(長さ100.0m, 幅1.0m, 高さ1.5m)を用いた。この水槽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分の消波材を設置している。また、1/10勾配の地形は、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して、それに続く水平床は8.0mとしている。この1/10勾配地形と水平床には、長さ200cm, 幅100cm, 厚さ2.0cmの鉄板を用いて製作した。

作用波は、規則波およびBretschneider・光易型スペクトルの不規則波とした。規則波は波高 $H_1=16.1\sim 29.7\text{cm}$ 、周期 T が一定の $T=1.79\text{s}$ の5波種とし、不規則波は有義波高 $H_{1/3}=14.9\sim 18.1\text{cm}$ 、有義周期 $T_{1/3}=1.79\sim 2.04\text{s}$ である。水路床での造波水深 h_1 はCASE1で $h_1=102.25\text{cm}$ （波圧実験では $h_1=101.0\text{cm}$ も併せて実施）、CASE2で $h_1=100.5\text{cm}$ とした。換算沖波波高 H_0 は、造波波高（不規則波は有義波高）に浅水係数を掛けて算定している。

(2) 堤体模型の構造諸元

実験では、遊水部付き消波工を有する堤体として、図-2 a) CASE1, b) CASE2に示す2タイプの構造模型を用いた。ともに消波工としておよそ640gの質量のテトラポッドを乱積しており、直立堤はABS樹脂およびアクリルで製作した。ここで、消波工の天端高 h_c 、天端幅 B 、遊水部幅（直立堤からの消波工までの離岸距離） l などの構造諸元は、「漁港・漁場の施設の設計の手引（2003年版）、水産庁監修」⁴⁾（以下、「手引」という）を参考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 hc と直立堤の天端高 R との比が $hc/R=0.556$ であり、「手引」において海底勾配1/30より緩勾配の場合に耐波設計上、最低限要求される構造諸元としている。また、遊水部幅 P についても、構造物設置位置での波長 L に対して $P=0.1L$ 程度であり、「手引」で最低限要求される距離を設定した。直立堤の設置水深 $h2$ は $h2=22.25\text{cm}$ である。また、伝達波高の実験においては、直立堤部分にパラペットおよび堤体幅を拡張した。

一方、CASE2は消波工の天端高と直立堤の天端高との比が $hc/R=0.905$ であり、越波流量および直立堤への作用波圧の低減効果がより優れることを期待した構造体である。遊水部幅 l は、同じく構造物設置位置での波長 L に対して $l=0.1L$ 程度としている。直立堤の設置水深は $h_2=20.5\text{cm}$ である。

なお、ここで想定した堤体模型の縮尺は、ともに1/20~1/40程度である。

(3) 計測方法

造波波高，伝達波高および遊水部での水位変動等は，容量式波高計を用いて測定した．また，越波流量は，直立堤前面壁を越波した水を集水升に集めて，荷重計（定格容量0.98kN, 100kgf）により計測した．さらに，波圧は直立堤前面壁の7箇所波圧計（定格容量19.6kPa, 200gf/cm²）を取り付けて計測した．それぞれの計測は，規則波で10波分，不規則波でおよそ200波分として，波高計・荷重計で20ms，波圧計で200 μ sのサンプリングタイムでAD変換してデータを収集した．

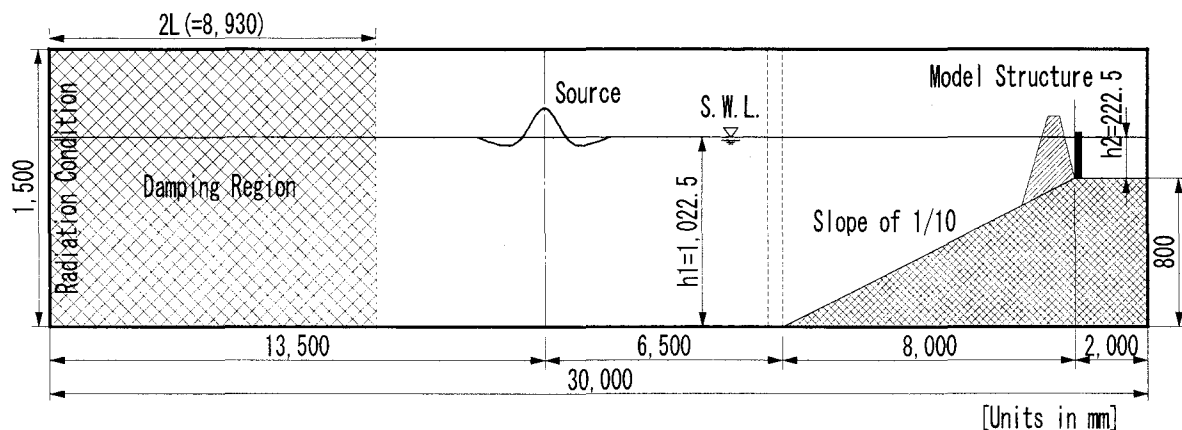


図-3 数値計算に用いた水槽および堤体の配置位置

3. 数値計算の方法

自由水面を有する流体をNavier-Stokesの方程式で直接計算する手法にVOF法 (Volume of Fluid Method) がある。ここでは、VOF法の計算プログラムとしてCADMAS-SURF Ver.4.0⁵⁾を使用した。

数値計算で用いた水槽および構造体の設置位置を図-3に示す。これは、水理模型実験で用いた地形勾配および堤体模型とまったく同じ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 $H=15.0\sim 30.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.79\text{s}$ とした。計算条件は榊山ら⁶⁾の研究成果を踏まえて表-1のとおりを設定した。そして、計算結果から直立堤前面壁における水平方向流速 $U(x,z,t)$ にVOF関数 $F(x,z,t)$ を乗じて越波流量 q を算定した。

表-1 VOF法の計算条件

計算領域	長さ(x方向)3,000cm, 高さ(z方向)150cm
計算格子	水平方向格子間隔 $\Delta x=4.0\text{cm}$ ($x=0.0\text{cm}\sim 1,960\text{cm}$), 隣り合う格子間隔の比が0.9倍以上となるように Δx を暫減 ($x=1,960\text{cm}\sim 2,000\text{cm}$), $\Delta x=1.0\text{cm}$ ($x=2,000\text{cm}\sim 3,000\text{cm}$) の不等間隔 鉛直方向格子間隔 $\Delta z=1.0\text{cm}$ の等間隔
造波ソース	$x=1,352\text{cm}$ 地点
境界条件	Sommerfeldの放射条件と2波長分のエネルギー減衰帯 (左端 $x=0.00\text{cm}$), Sommerfeldの放射条件 (右端 $x=3,000\text{cm}$)
地形勾配	$x=2,000\text{cm}\sim 2,800\text{cm}$ の区間で1/10勾配
直立堤設置位置	前面壁が $x=2,800\text{cm}$ 地点
計算スキーム	DONOR-0.1
VOF関数 F	フリー
その他境界・諸量	スリップ条件
ポーラス値下限値	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 $V_1=0.5$, 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30 s 間
時間刻みの安全率	0.25
サンプリングタイム	$T/100$

4. 結果および考察

(1) 遊水部における水位上昇量

図-4に遊水部の水位上昇量 η の水理実験結果を計算結果とあわせて示す。図中では、直立堤設置水深 h_2 と換算沖波波高 H_0' との比を横軸に、水位上昇量 η と H_0' との比を縦軸として無次元化している。

まず、規則波の実験結果に着目するとCASE1, CASE2ともに水深波高比 $h/H_0'<1.0$ の領域で水位上昇量・波高比 η/H_0' がおおよそ0.25~0.38となっており、菅原・山本⁸⁾による1/10勾配地形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。これは消波工を越波して遊水部へ打ち込む水量に対して、消波工が抵抗となり、遊水部の水が沖へと戻るのを阻害していることが主な要因である。図-5に示すVOF法の結果からも実証される。また、両ケースともに h/H_0' と η/H_0' は、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の水位上昇量がCASE1と比較して15%程度小さい。計算結果はCASE1でバラツキがあり実験結果と一致度は良くないものの、CASE2では良好に再現しており、水位上昇量の算定でVOF法が有効であることがわかった。

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がみられない。

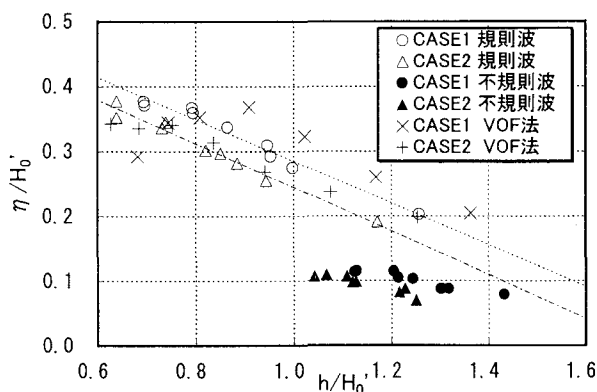


図-4 遊水部における水位上昇量

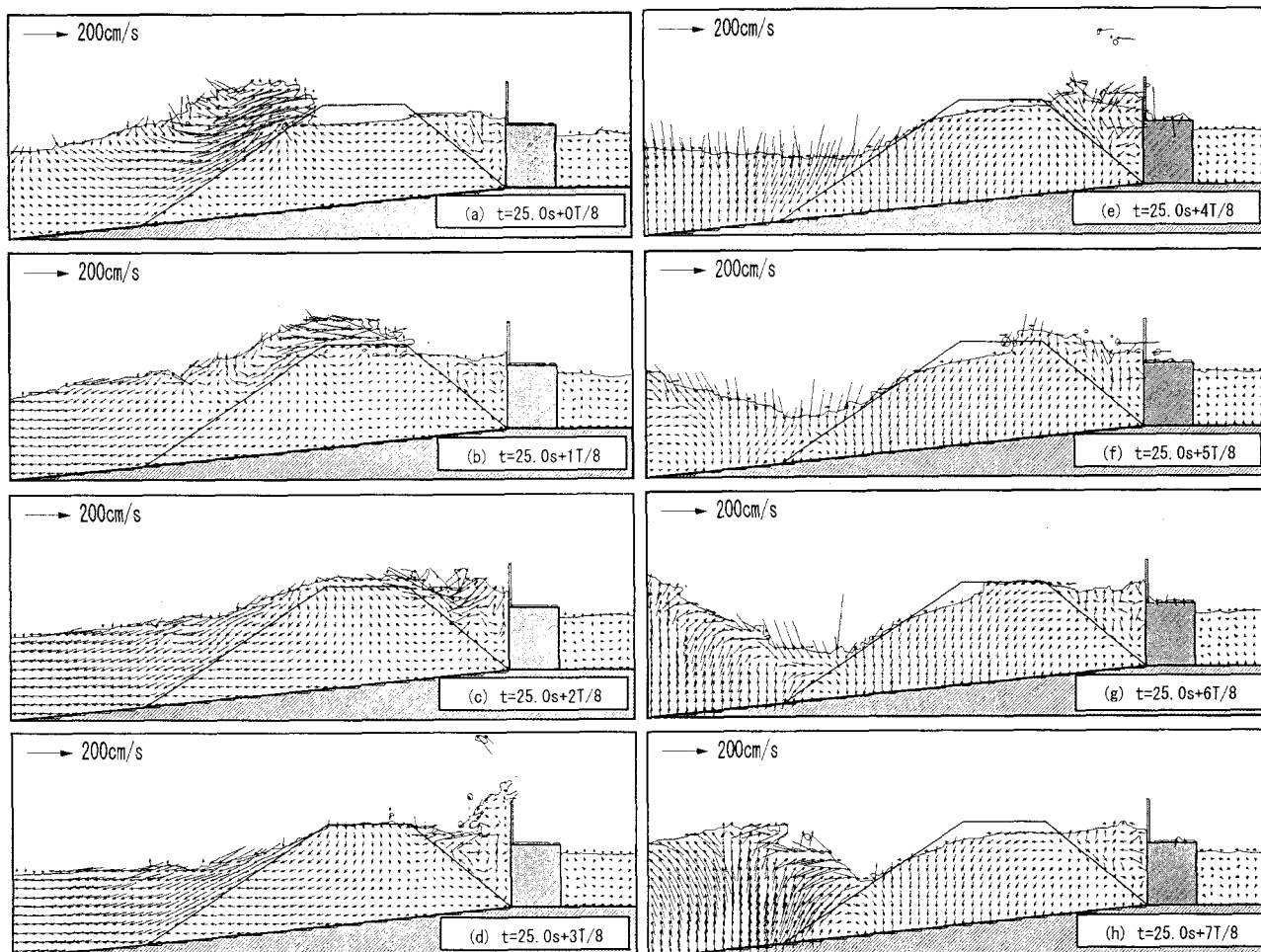


図-5 CASE1へ作用する波の状況 (VOF法, $H_0 = 27.5\text{cm}$, $T=1.79\text{s}$, 表示範囲 $250\text{cm} \times 90\text{cm}$)

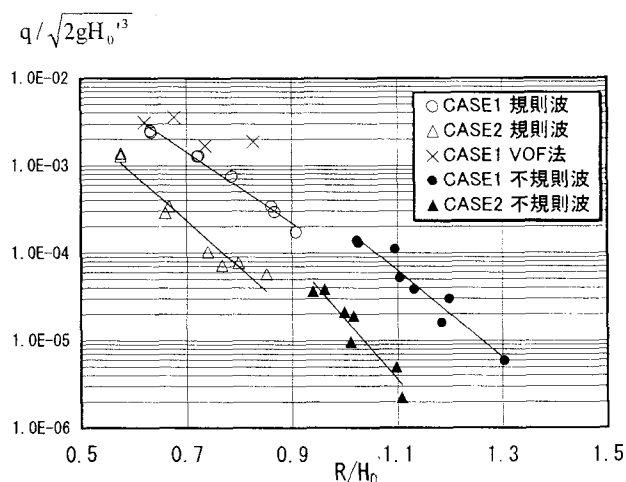


図-6 無次元越波流量

(2) 越波特性および越波流量

図-5はCASE1の計算結果の一例であり、 $T/8$ 毎の時系列図である。ここで、水表面はVOF関数 $F=0.5$ でコンターを描いている。この図から、遊水部付き消波工を有する堤体の越波特性としては、消波ブロック式傾斜堤を乗り越えて遊水部へと打ち込んだ水塊が、遊水部の大きさの制約から直立

堤前面壁に当たって鉛直方向に押し上げられることで越波が生じていることがわかる。これは水理実験においても、規則波の大波高時に遊水部への打ち込み量が過大となって、遊水部が満杯になることを確認している。かつこの時、激しい越波が生じる。やはり、利用上の観点からは、越波現象は時間平均的な取り扱いだけでは不十分であると考え。

つぎに直立堤天端高と換算沖波波高の比 R/H_0 と無次元越波流量 $q / \sqrt{2gH_0^3}$ の関係を図-6に示す。規則波および不規則波の実験結果ともに R/H_0 の減少にともなって、越波流量は指数関数状に増加している。ここで、CASE1とCASE2を比較するとCASE1の方が越波量が多いが、これは先にも述べた消波工の天端高 hc と直立堤の天端高 R との比 hc/R の違いによる効果である。通常の消波ブロック被覆堤と比較すると、合田ら⁹⁾の期待越波流量で 4×10^{-4} 程度と見積もられることから、CASE1でおよそ1/3未満に、CASE2では1/10未満に越波流量が低減している。なお、計算結果は実験結果と比較して若干大きい越波流量になっているものの、VOF法が遊水部付き消波工を有する堤体の越波流量の検討に有効であることが明らかとなった。

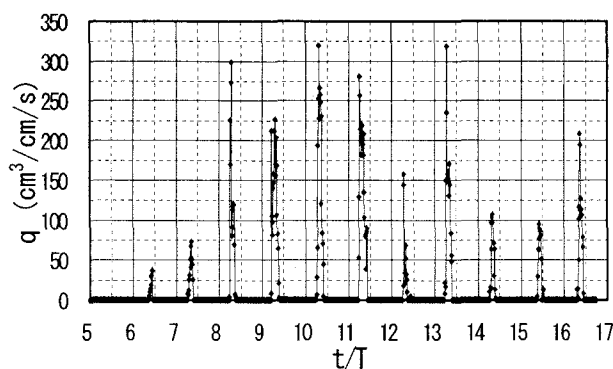


図-7 越波流量の時系列 (VOF法, $H_0' = 27.5\text{cm}$, $T = 1.79\text{s}$)

図-7にCASE1を対象におこなった計算の越波流量 $q(t)$ の時間変化を示す。1/10勾配地形上で碎波した波が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平均水位の変動により、規則波ではあるものの各周期毎の越波流量にバラツキがみられる。このため、定常状態としてどの時間帯の越波流量を算定するのかといった点で問題があるが、ここでは計算時間の最後5T分を用いることにした。なお、先に述べた計算による無次元越波流量も同じ取り扱いである。本計算条件の場合、瞬間越波流量の最大値は時間平均越波流量の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。やはり、利用上の観点を踏まえると、時間平均量に加えて越波流量の時間変動を考慮することが必要であるといえる。

(3) 伝達波高

CASE1を対象におこなった伝達波高の実験結果を図-8に示す。ここでは、直立堤天端高 R と堤体設置位置の進行波としての波高 H_i の比 R/H_i と波高伝達率 K_t で整理している。伝達率は、直立堤背後1m地点で計測した伝達波高を波高 H_i で除したものとした。本構造体では越波量それ自体が少ないことから、越波による2次発生波も小さく、図中の波高伝達率 K_t は規則波でも0.06が上限となっている。漁港の防波堤は $R/H_i = 1.0$ が一般であることから、防波堤としても有効であることが判明した。

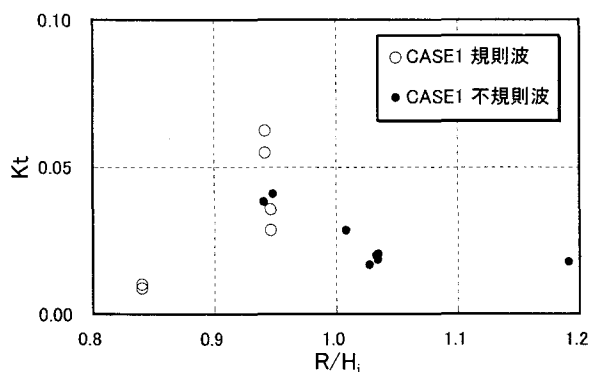


図-8 波高伝達率

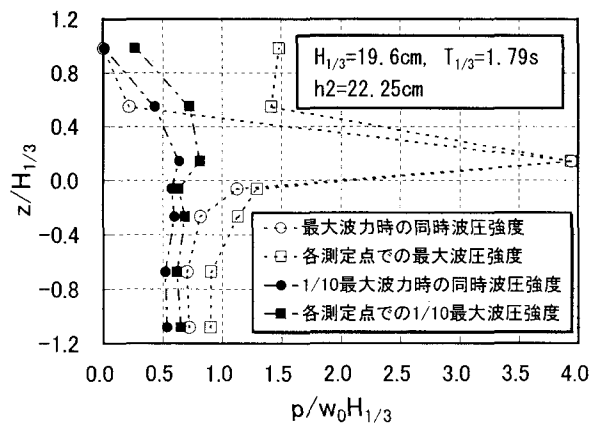


図-9 波圧強度分布 (CASE1)

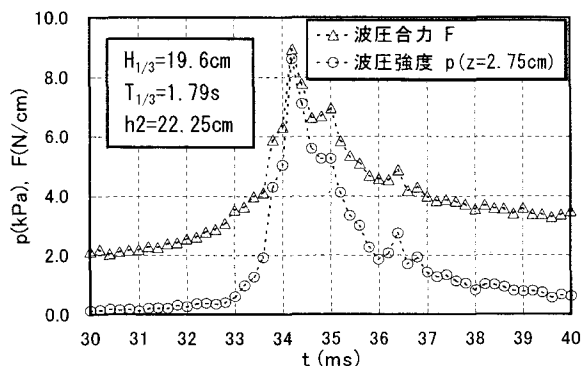


図-10 波圧強度および波圧合力の時系列 (CASE1)

(4) 作用波圧

波圧は不規則波実験結果について述べる。まず、CASE1の直立壁で計測した作用波圧 p のうち、各測定点での最大波圧強度と最大波力時の同時波圧強度を各測定点での1/10最大波圧強度と1/10最大波力時の平均同時波圧強度とあわせて図-9に示す。ここでは、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 $H_{1/3}$ と水の単位体積重量 w_0 を用いて無次元表示とした。静水面は $z=0\text{cm}$ としている。また、この時の波条件は、実験波の中で最大波圧強度が最も大きかった波高 $H_{1/3}=19.6\text{cm}$ 、周期 $T_{1/3}=1.79\text{s}$ である。図より静水面上 $z/H_{1/3}=0.14$ の位置において $p/w_0H_{1/3}=4.0$ 程度であり、衝撃的な波圧が作用していることがわかる。ただし、この時図-10に示すように、最大波圧合力および最大波圧強度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る。この位置で最大波圧強度が表れるのは、遊水部での水位上昇による影響と考えられる。なお、 $z/H_{1/3}=0.98$ 位置の上部に取り付けた波圧計においては、 $p/w_0H_{1/3}=1.5$ 程度となっている。これは、波高の大きい時に遊水部への打ち込む現象のためと考えられる。1/10最大波力時の平均同時波圧強度は、静水面下および静水面上 $z/H_{1/3}=0.14$ の位置までは $p/w_0H_{1/3}=0.6$ 程度の均一な圧力分布であり、静水面上 $H_{1/3}$ で $p/w_0H_{1/3}=0$ の三角形分布になっている。これは「手引」の設計波圧分布と相似関係にある。

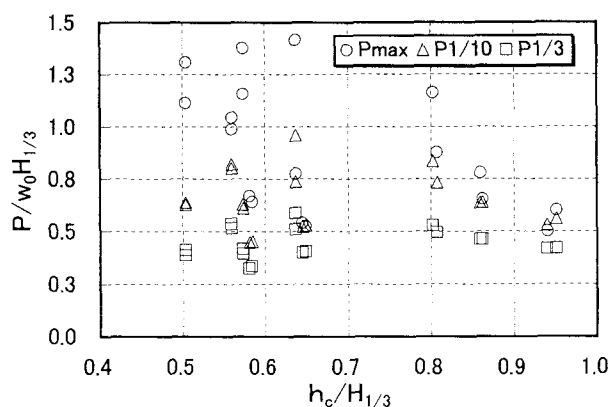


図-11 断面平均波圧強度

図-11にCASE1およびCASE2の無次元断面平均波圧強度 $P/w_0H_{1/3}$ を示す。横軸は消波工の天端高 hc と進行波としての波高 $H_{1/3}$ との比とした。ここ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 $F_{1/3}$ を算定して、これらを $(h_2+0.5H_{1/3})$ 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 $P_{1/3}$ と定義している。通常の消波ブロック被覆堤と同じ波力低減効果を期待するためには、 $P/w_0H_{1/3}$ が1.3以下になることである³⁾。しかしながら、 $hc/H_{1/3}$ が0.64程度でも $P_{max}/w_0H_{1/3}$ は1.3を超えている。1/10最大、有義波圧強度ともに $P/w_0H_{1/3}$ が1.0未満の値になっており、先に述べたように最大波圧合力および最大波圧強度のピークの前後1ms程度でそれぞれの値がほぼ半減していることをあわせて考えると、波圧合力および波圧強度の最大値の取り扱い方法を今後、検討する必要がある。

5. まとめ

本研究により、1/10の急勾配地形における遊水部付き消波工を有する堤体の越波量、水位上昇量、伝達波高、作用波圧の水理特性を概ねつかむことができた。主要な結果は以下のとおりである。

- ①規則波の実験結果からは、CASE1、CASE2ともに水深波高比 h/H_0' が1.0未満の領域で水位上昇量・波高比 η/H_0' がおよそ0.25～0.38と大きな水位上昇が生じる。これは消波工を越波して遊水部へ打ち込む水量に対して、消波工が抵抗となり、遊水部の水が沖へと戻るのを阻害していることが主な要因である。また、両ケースとも h/H_0' と η/H_0' は、ほぼ直線関係である。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がみられない。
- ②遊水部付き消波工を有する堤体の越波特性としては、消波ブロック式傾斜堤を乗り越えて遊水部へと打ち込んだ水塊が、遊水部の大きさの制約から直立堤前面壁に当たって鉛直方向に押し上げられることで越波が生じる。これは、大波

高時に遊水部への打ち込み量が過大となって遊水部が満杯になるからである。

- ③通常の消波ブロック被覆堤の性能と比較すると、CASE1でおおよそ1/3未満に、CASE2では1/10未満に越波流量が低減する。ただし、激浪時の瞬間越波流量の最大値は時間平均越波流量の8.7～29.3倍、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生じる。利用上の観点を踏まえると、時間平均量に加えて越波流量の時間変動を考慮する必要がある。
- ④遊水部付き消波工を有する堤体は、越波量それ自体が少ないことから、越波による2次発生波も小さい。したがって、防波堤としても有効な工法である。
- ⑤波条件によっては、直立堤壁面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る。また、堤体上部にも有意な波圧が作用する。これらについては、耐波設計上の観点から、断面平均波圧強度とあわせて取り扱い方法を今後検討する必要がある。

謝辞：本研究の実施においては、水産工学研究所水産土木工学部水理研究室の中山哲厳室長から助言を頂き有益であったこと、および国際気象海洋株式会社の小林学氏には水理模型実験の実施、データ解析を補佐して頂いたことをここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 間辺本文，山本正昭，中山哲厳：遊水部を有する消波工付護岸の越波に関する不規則波実験，第33回海岸工学講演会論文集，pp.392-396，1986。
- 2) 山本泰司，水野雄三，鈴木孝信，笹島隆彦，松本英明，桑原幸司：二重堤の越波流量算定法について，海洋開発論文集，Vol.13，pp.585-590，1997。
- 3) 中泉昌光，山本正昭：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，pp.11-23，1989。
- 4) 水産庁監修：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，1008p，2003。
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発（CADMAS-SURF），沿岸開発技術ライブラリー，No.12，2001。
- 6) 榊山 勉，今井澄雄：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，第43巻，pp.696-700，1996。
- 7) 榊山 勉，香山真祐：海底斜面上で砕波を伴う消波護岸への越波の数値計算，海岸工学論文集，第44巻，pp.741-745，1997。
- 8) 菅原輝男，山本正昭：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，pp.1-21，1978。
- 9) 合田良実，岸良安治，神山 豊：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，第14巻，第4号，pp.3-44，1975。