

浮防波堤に付設する波運動利用方式の 鉛直混合促進装置の開発

DEVELOPMENT OF A WAVE-POWERED VERTICAL MIXING DEVICE OF
SEA WATER ATTACHED TO A FLOATING BREAKWATER

中村孝幸¹・塚原靖男²・佐伯信哉³・岡田修平⁴

Takayuki NAKAMURA, Yasuo TSUKAHARA, Shinya SAEKI and Syuuhei OKADA

¹正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

²非会員 工修 三井造船株式会社 大分工場 (〒870-0395 大分県大分市大字日吉原3番地)

³正会員 博(工) (株) 荒谷建設コンサルタント 岡山支社 (〒700-0976 岡山県岡山市北区辰巳20-109)

⁴非会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田二丁目四番二十四号)

In this study, a device for activating sea water mixing and diffusion in the sea has been developed for improving sea water environment especially in a semi-closed bay with comparatively deep sea depth. The device is designed to be attached to the conventional floating breakwater, typically pontoon type floating breakwaters, for saving the construction cost. The device is intended to be powered by wave motions of nominal waves having comparatively low wave height and short wave period. A water chamber type device comprised of a row of vertical walls of different drafts and a submerged horizontal plate was adopted as a typical model in order to be able to utilize piston mode wave resonances and resultant vortex generations for the effective vertical mixing. A wedge section of the front wall was adopted to induce the mean current along the vertical direction of the device as a resultant effect of asymmetrically generated vortex flows at the mouth of the water chamber. Additional effect of the device for reducing reflected and transmitted waves was also examined.

Key Words : Wave dissipation, vertical mixing, semi-closed bay, piston mode wave resonance, water-chamber type floating structure

1. はじめに

東京湾や大阪湾などの半閉鎖性内湾域では、背後に巨大な人口を擁する都市の存在により、汚濁負荷の増加や蓄積に起因する富栄養化が進行している。そのため、著者ら¹⁾は半閉鎖性内湾域の常時波浪を原動力とする鉛直混合促進型護岸を提案し、一様密度場において有意な混合効果および消波効果を発揮できることを確認した。さらに著者ら²⁾は、この混合効果が密度成層場においても有意に発揮されることを明らかにしている。

本研究は、やはりこのような半閉鎖性内湾域や海面養殖が盛んな水域を対象として、水質改善対策をより安価且つ簡易に行なうことを目的とし、鉛直混合促進型構造物の浮体化を目指すものである。ここでは、同構造体の浮体化を前提として、有効な断面形状を見出すための予備的検討を行なう。具体的には、図-1に示すように浮体形式の防波堤や栈橋の側面に鉛直混合促進装置を付設し、従来の鉛直混合促進型構造物を基礎とした新規断面の提案を行なう。そして、提案断面の有効性を確認するため、実験お

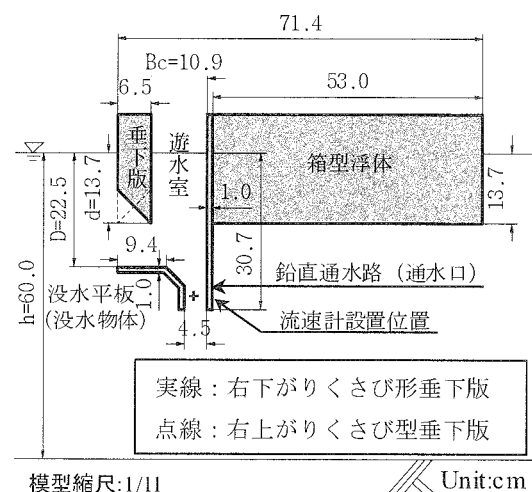


図-1 基本形状の模型堤体

よび理論による検討を行い、総合比較から最も有効な断面形状について明らかにする。

本研究で目標とする浮体式鉛直混合促進装置は、装置の水面固定時における効果に加えて、装置を取り付けた浮体の波浪動揺をも鉛直混合の駆動力とし

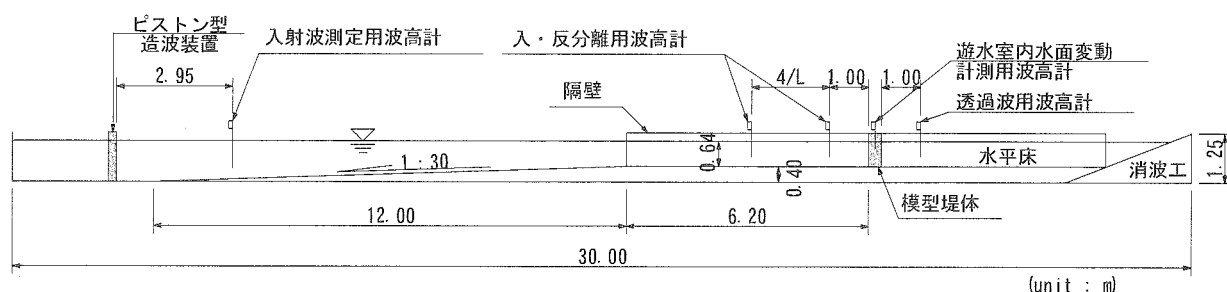


図-2 実験水槽および波高計配置図

て利用することを想定している。現段階では、この第1ステップの基礎的な研究として、浮体が水面に固定された状態を仮定して検討を進める。このため、鉛直混合の主要な駆動力は、著者ら¹⁾が既に直立護岸構造物を対象にして明らかにしたピストンモード波動運動と前面垂下版の構造特性に起因する順流時と逆流時の剥離渦の非対称性によるものとしている。ここでは、浮体式構造で必要となる浮力体を兼ねた構成部材を新たに採用した混合促進装置の提案を行い、その装置が本来の機能を維持または強化できるかを通水口における流速に着目して検討する。同時に、防波堤が保有すべき本来の波浪制御機能についても実験と理論の両面から検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験は、図-2に示す二次元造波水槽を用いた。この水槽は、長さ30m×幅1m×深さ1.25mの規模で、水路内には1:30勾配のスロープが設けられている。なお、図中には、模型堤体の設置位置と波高計の設置位置を併せ示してある。水槽の水平床部分には、水路幅を2分するように隔壁を設置し、一方では入射波を、他方では模型堤体を設置し、入射波および透過波を同時に測定できるようにした。この水槽の一端にはピストン型造波装置が、他端には砕石およびヘチマロンよりなる透過型の消波工が設置されている。また、消波工部分の隔壁は一部を開放し、模型堤体の効果による平均流が発生した場合でも、堤体前後に水位差が生じ難い構造としてある。

(2) 模型堤体

本研究で提案する鉛直混合促進装置は、図-1に示すように、既設の箱型浮体の側方に付設する構造形式を前提として開発を進めた。そして、現段階では、半閉鎖性海域の常時波浪を対象にしているため、箱型浮体の波浪動揺量は小さいものと仮定して、構造体全体が仮想的に水面に固定されている状態を想定した。

鉛直混合促進装置の基本形状の断面としては、著者ら¹⁾の従来の研究に基づき、没水平板に開口部を設け、くさび形状の垂下版を有する構造を用いた。

くさび形状の開口部は、出入りする往復流において押波時と引波時における抵抗が異なるため、結果的にある特定の方向へ平均流を生成することが明らかとなっている。本研究では、この有意な幅を有する垂下版が浮力体の役割を兼ねるものと想定する。構造諸元は、遊水室内でのピストンモード波浪共振の生起に着目し、中村ら³⁾による断面設定法に基づき設定してある。想定した波条件は、閉鎖性内湾域での常時波浪に相当する、周期 $T=3.5$ s程度、波高 $H=50$ cm程度とした。

図-3は、波浪動揺を利用し、構造体の鉛直方向の水塊を輸送するメカニズムをイメージ化したものである。構造体に波浪動揺が生じる場合、水面の振動と構造体の振動には位相差が生じるが、簡単化のため、相対的に構造体のみが振動する場合を示してある。図-3(a)に示す右下がりくさび形状の構造体では、下降時に遊水室内に取り込んだ上層水を深部まで輸送し、上昇時に鉛直通水路から遊水室内の水塊を放出する。この作用の継続により上層水塊を下層に輸送する機能を期待する。

一方、図-3(b)に示す右上がりくさび形状の場合では、下降時に鉛直通水路から下層の水塊を取り込み、上昇時には遊水室内に取り込んだ水塊を上層まで輸送する。この作用の継続により下層水塊を上層に輸送する機能を期待する。

そのため、上層水塊を下層に輸送する機能を期待する構造体では、下降時に水塊が遊水室内に進入し易く、上昇時に垂下版下端より放出し難い構造が求められる。一方、下層水塊を上層に輸送する機能を期待する構造体では、下降時に垂下版下端より水

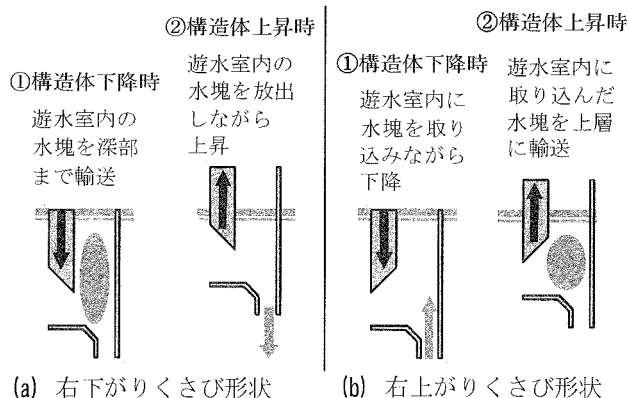
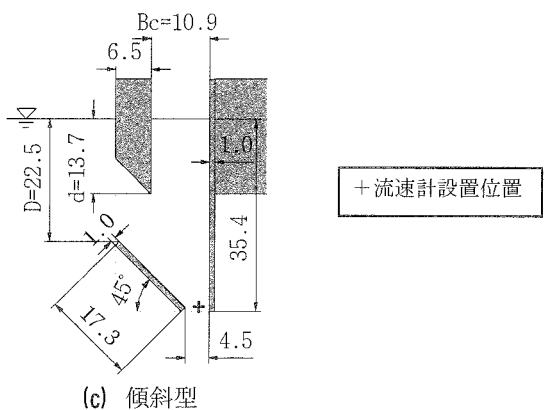
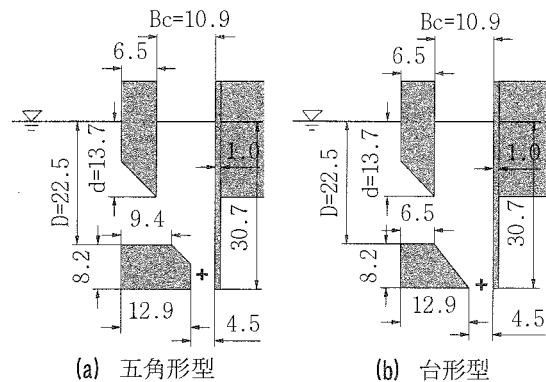


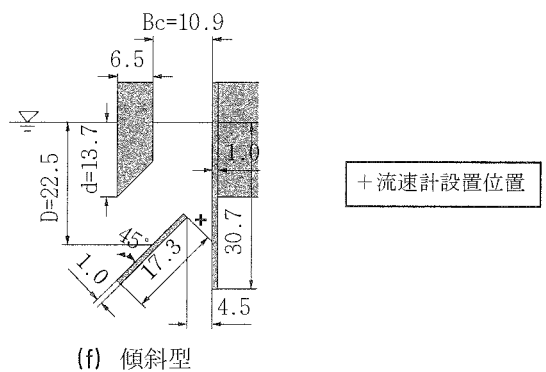
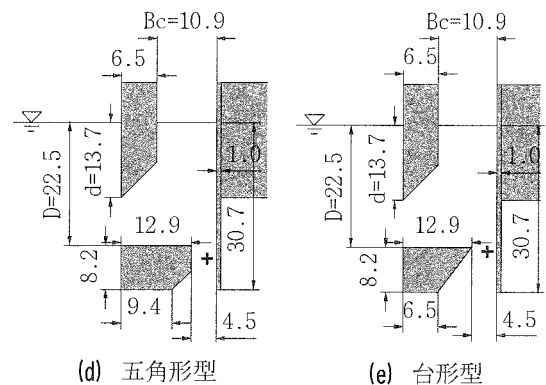
図-3 水塊輸送機能メカニズムのイメージ図

塊が遊水室内に入り難く、上昇時に放出し易い構造が求められる。

図-4は、図-1に示す基本形状に対して水塊輸送機能の効率化および構造体の安定化を図ることを目



(1) 右下がりくさび形垂下版形状



(2) 右上がりくさび形垂下版形状

図-4 新規形状の模型堤体

的とした新規形状の模型堤体を示したものである。

図-4 (a) に示す五角形型は、前面垂下版を右下がりくさび形状とし、没水平板を五角形としたものである。五角形型は、基本形状における没水平板に浮力体の役割を兼ねた没水物体とすることで構造体の安定化を目指すとともに、基本形状と同様に鉛直下向きの平均流の生成による水塊輸送機能を期待した。

図-4 (b) に示す台形型は、五角形型の通水口形状を改良した構造体である。

図-4 (c) に示す傾斜型は、やはり通水口下部からの流体の進入を制御し、遊水室からの流出を容易にするような通水口形状を有するが、前面開口部の構造が基本形状とは異なり、垂下版構造の水理特性による効果はあまり期待できない。

図-4 (d) に示す五角形型は、前面垂下版を右上がりくさび形状とし、没水平板を五角形としたものである。五角形型は、浮力体を兼ねた没水物体を有し、通水口形状は通水口下部からの流体の進入を容易にし、遊水室からの流出を制御することによる鉛直上向きの平均流の生成と水塊輸送機能を期待した。

図-4 (e) に示す台形型は、五角形型の通水口形状を改良した構造体である。

図-4 (f) に示す傾斜型は、やはり鉛直方向流れの制御機能を期待する通水口形状を有するが、前面開口部の構造が基本形状とは異なり、垂下版構造の水理特性による効果はあまり期待できない。なおここでの模型堤体の縮尺は、いずれも1/11程度とした。

(3) 計測方法

a) 波変形の計測

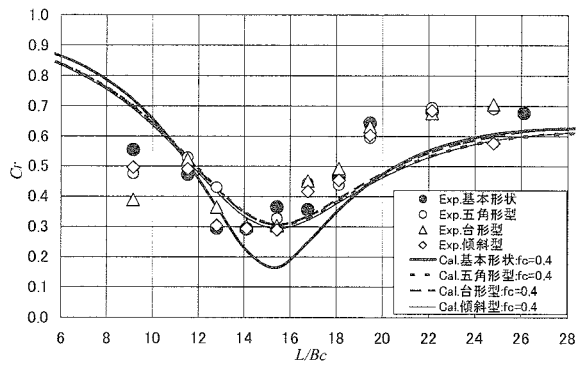
波変形の計測は、図-2に示す位置に6台の容量式波高計を設置した。模型堤体の沖側には、沖波計測用に1台、入・反射波の分離推定用に2台、透過波計測用に1台、堤体の遊水室内における波高測定用に1台、模型堤体横の回流用水路にも入射波測定用に1台設置した。なお、反射率の推定には、合田ら⁴⁾の入・反射波の分離推定法を用いた。

b) 流速の計測

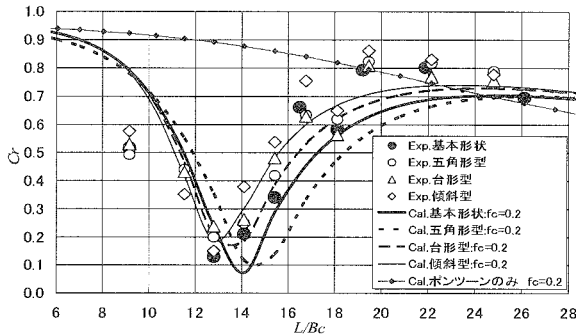
通水口(鉛直通水路)における流速は、1台の電磁流速計を用い、図-1、4に示す位置にて計測した。

(4) 実験条件

実験で用いた波条件は、静穏な内湾域における常時波浪を想定して、入射波高 $H=5\text{cm}$ (現地量で $H_p=0.5\text{m}$ 程度)、周期 $T=0.8\sim 1.4\text{ s}$ (現地量で $T_p=2.7\sim 4.6\text{ s}$)の規則波を用いた。水深 h は、全ての実験において $h=60\text{cm}$ (現地量で $h_p=7\text{m}$ 程度)で一定としたが、造波性能および水槽の規模による制限を受けるためであり、現地海域では、水深20m以上における構造体の設置を目標としている。

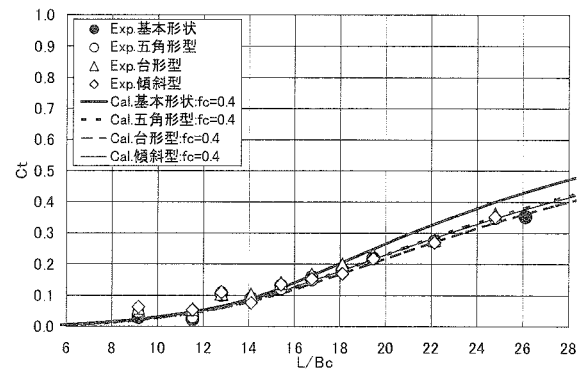


(a) 右下がりくさび形垂下版形状

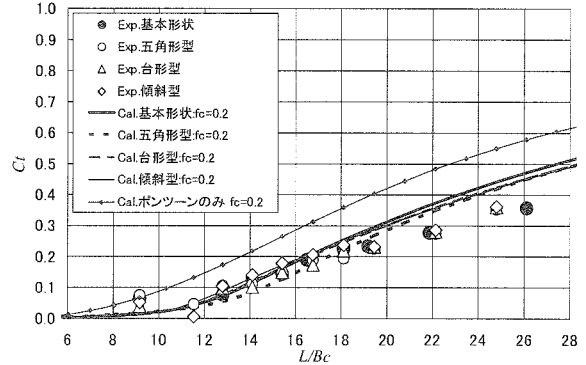


(b) 右上がりくさび形垂下版形状

図-5 各模型堤体による反射率 C_r



(a) 右下がりくさび形垂下版形状



(b) 右上がりくさび形垂下版形状

図-6 各模型堤体による透過率 C_t

3. 結果および考察

(1) 波浪制御効果

a) 反射率

図-5は、右下がりくさび形垂下版および右上がりくさび形垂下版形状の各模型堤体における反射率 C_r の実験結果および中村ら⁵⁾による減衰波理論に基づく算定結果を、周期のパラメータである波長遊水室幅比 L/Bc による変化で示す。なお、減衰波理論による算定で必要となる線形抵抗係数 f_c は、既往の研究結果および実験結果との整合性を考慮し、右下がりくさび形垂下版形状の場合、 $f_c=0.40$ 、右上がりくさび形垂下版形状の場合は、 $f_c=0.20$ とした。

図-5(a)より、右下がりくさび形垂下版形状のいずれの堤体においても、反射率 C_r の実験結果と算定結果は、 $L/Bc=14\sim16$ 付近において極小値を示し、 $L/Bc=11.5\sim19.5$ （現地波周期で $T_p=3\sim4s$ 程度）に対して概ね $C_r<0.5$ となるなど有意な反射波低減効果が確認される。

図-5(b)より、くさび形状を右上がり構造とすることで、反射率 C_r の低減特性は多少ながら短周期側にシフトして、 $L/Bc=13\sim15$ 付近において極小値を示し、 $L/Bc=11\sim16$ （現地波周期で $T_p=3\sim3.5s$ 程度）で概ね $C_r<0.5$ となることなどが確認される。特に、右上がりくさび構造とすることで、反射率の極小値が低下する傾向にあることも確認できる。こ

れは、垂下版形状の効果により、引波時における垂下版下端からの水塊流出が促進されるとともに、それに伴う剥離渦の生成により、反射波エネルギーがより消費されたものと考えられる。

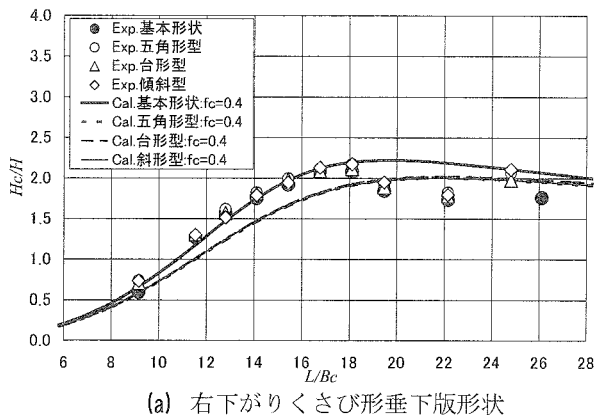
一方、図中には比較のため混合装置を付加しないときの反射率の算定結果を示すが、装置を取り外すと反射率は高くなることも確認できる。

b) 透過率

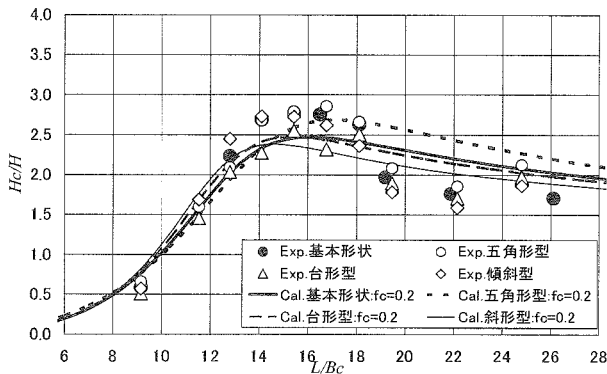
図-6は、右下がりくさび形垂下版形状および右上がりくさび形垂下版形状の各堤体における透過率 C_t の実験結果および減衰波理論に基づく算定結果を、波長遊水室幅比 L/Bc による変化で示す。

図-6(a)より、右下がりくさび形垂下版形状のいずれの堤体においても、透過率 C_t の実験結果と算定結果は、 $L/Bc<20$ （現地波換算周期で $T_p<4s$ 程度）において $C_t<0.3$ となることが確認できる。さらに、いずれの新規形状においても、基本形状と同程度の透過波低減効果が期待できると考えられる。

一方、図-6(b)に示す右上がりくさび形では、いずれの堤体形状でも、右下がりくさび形と同様に $L/Bc<20$ （現地波換算周期で $T_p<4s$ 程度）において $C_t<0.3$ となるなど、有意な透過波の低減効果が期待できる。このことから透過率は、垂下版のくさび形状には影響されず、遊水室背後の鉛直版吃水深に依存するものと推測される。これは、図-6(b)に示す混合装置を付加しないときの透過率が、比較的長周期の条件下で増大することからも確認できる。



(a) 右下がりくさび形垂下版形状



(b) 右上がりくさび形垂下版形状

図-7 各模型堤体による波高増幅率 H_c/H

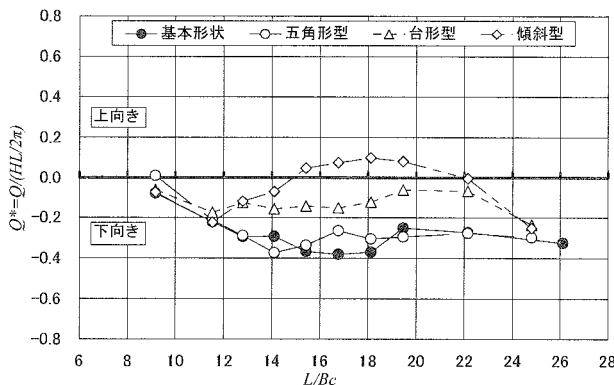


図-8 右下がりくさび形垂下版形状の各堤体の
通水口における無次元平均輸送流量 Q^*

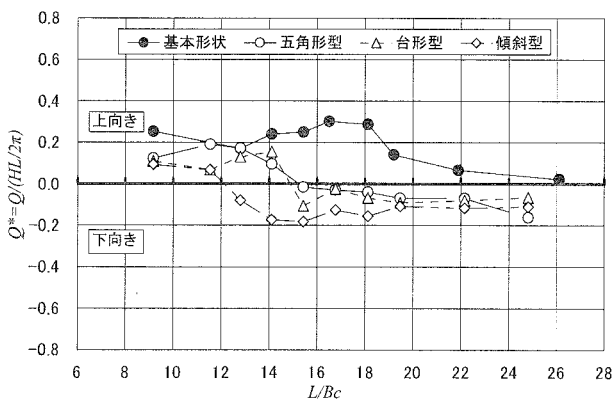


図-9 右上がりくさび形垂下版形状の各堤体の
通水口における無次元平均輸送流量 Q^*

(2) 遊水室内における波高増幅率

図-7は、右下がりくさび形および右上がりくさび形垂下版形状の各模型堤体について、遊水室内における波高増幅率 H_c/H の実験結果および減衰波理論に基づく算定結果を、波長遊水室幅比 L/Bc による変化で示す。

右下がりくさび形の結果を示す図-7(a)より、各堤体の波高増幅率は、算定結果と若干の差異が見られるものの、実験結果では全ての堤体について基本形状とほぼ同程度の大きさであることが分かる。そして、 $L/Bc > 14$ で $H_c/H > 1.5$ であり、極大値で2.0程度であることが確認できる。

一方、図-7(b)は、右上がりくさび形垂下版形状における結果を示す。やはり新規形状と基本形状の結果に大きな差異は見られず、 $L/Bc > 11$ で $H_c/H > 1.5$ となっている。右下がりくさび形と比較すると、波高増幅率は増大する傾向にあり、極大値で2.5程度と有意に増加している。これは、前面垂下版のくさび形状による影響と考えられ、右上がりくさび形状とすることで、遊水室内に上昇流が生起され易くなることによるものと考えられる。

(3) 通水口における平均輸送流量

図-8は、右下がりくさび形垂下版形状において、各模型堤体の通水口における平均輸送流量 Q を波運動による半周期間の移動水塊量 $HL/2\pi$ で除した無次元平均輸送流量 Q^* を L/Bc による変化で示す。

この図より、基本形状と五角形はほぼ同程度の絶対値と変動傾向を示す。これは、五角形型の遊水室構造、通水口形状および前面開口部形状が基本形状の堤体とほぼ同一であるためと考えられる。そして、五角形型の装置では、基本形状のそれと同様に有意な下向きの水塊輸送機能が期待できると言える。

一方、台形型の装置では、現地における常時波浪の想定周期帯で、基本形状による下向きの輸送流量の5割程度に留まることが認められる。これは、通水口形状の変化と遊水室断面積の変化により、遊水室下面に設けた没水部材による水塊の拘束が弱まり、没水部材下端からの水塊流出が増大することが原因と考えている。また、傾斜型においては、現地想定周期帯で有意な下向きの輸送流量は確認されない。これは、前面開口部形状を変化させたことにより、くさび形垂下版の水理特性が発揮されなかったことによるものと考えられる。

図-9は、右上がりくさび形垂下版形状のときの各模型堤体の通水口における無次元平均輸送流量 Q^* を示す。この図より、基本形状以外の堤体では有意な上向きの輸送流量は確認できない。五角形型と台形型においては、通水口形状と遊水室断面積の変化が通水口における流れに影響を与えたものと考えられる。傾斜型においては、それらの要因に加え、前面開口部形状を変化させたことによる垂下版水理

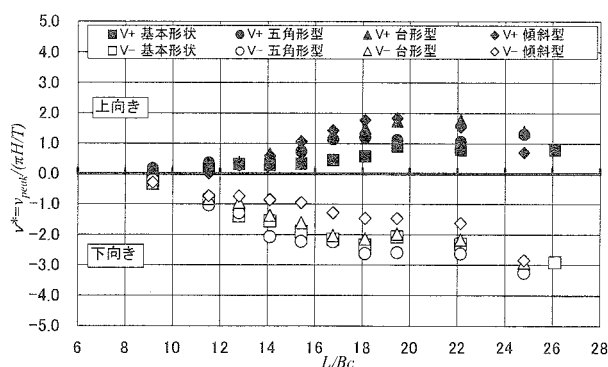


図-10 右下がりくさび形垂下版形状の各堤体の
通水口における無次元流速振幅 v^*

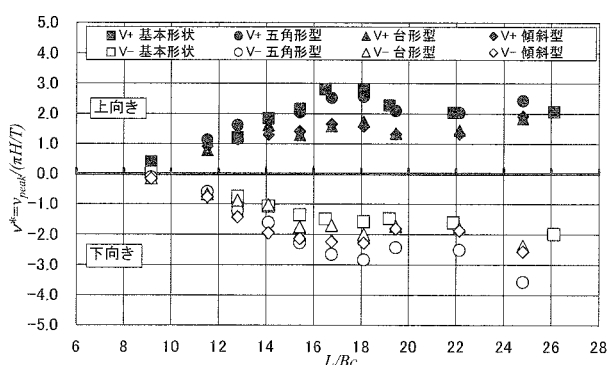


図-11 右上がりくさび形垂下版形状の各堤体の
通水口における無次元流速振幅 v^*

特性の無機能化が考えられる。

(4) 通水口における流速振幅

著者ら⁶⁾は、密度成層場における水理模型実験より、密度成層の破壊を引き起こす要因として、通水口（鉛直通水路）よりの流速振幅の絶対値に着目し、それが成層破壊と密接な関係があることを明らかにしている。そこで、本研究での浮体式構造体に対しても、同様に通水口よりの流速振幅の絶対値に着目してみた。

図-10は、右下がりくさび形垂下版形状において各模型堤体の通水口における鉛直方向の流速振幅 v_{peak} を進行波の諸元で除した無次元流速振幅 v^* を、波長遊水室幅比 L/Bc による変化で示す。

この図より、五角形型と台形型は、基本形状と同程度の下向きの流速振幅が確認されるものの、傾斜型においては、下向きの絶対値が他の形状に比べ小さいことがわかる。これはやはり前面開口部の形状を変化させたことによる影響と考えられる。

図-11は、右上がりくさび形において各模型堤体の通水口における無次元流速振幅 v^* を同様にして示す。この図より、五角形型においては、基本形状と同程度の上向きの流速振幅が確認できるものの、他

の形状は基本形状に劣る結果となった。傾斜型においては、やはり前面開口部の形状を変化させたことによる影響が考えられる。

流速振幅の絶対値は、上向きおよび下向きの両者ともに、右上がりくさび形の場合に大きくなることが確認され、遊水室内における波高増幅率との関係が示唆される。しかしながら、通水口における一方向平均流の生成に寄与する流速振幅の非対称性は、右下がりくさび形の場合に大きいことも確認できる。

4. 結語

(1) 本研究で提案した新規の構造体は、静穏な内湾域における常時波浪を対象とした周期帯において、有意な波浪制御効果が期待できる。

(2) 浮体式構造への展開を想定して提案した右下がりくさび形垂下版を有する五角形型装置では、基本形状の構造体と同様に、通水路を介した平均流の生成および下向きの極大流速の発生が確認されるなど、本研究で提案した堤体モデルの中では鉛直混合装置として最も優れている。また、この堤体はフロートの役割を兼ねた没水部材を有することからも、将来的な浮体化に適したモデルと考えられる。

(3) 右上がりくさび形垂下版を有する五角形型は、十分な上向き平均流の生成は確認できなかったものの、遊水室内のピストンモード波浪共振に伴う波高増幅率が最大で2.5程度になることやそれに伴う鉛直通水路での振動流速振幅の絶対値が基本形状を上回るなど、今後の改良により有効な鉛直混合装置へと展開することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 佐伯信哉・中村孝幸：低反射式鉛直混合促進型護岸の効果と循環流の発生機構について、海岸工学論文集，第55巻，pp.1236-1240，2008。
- 2) 佐伯信哉・中村孝幸・岡田修平：密度成層場における鉛直混合促進型護岸の効果と混合特性について、海岸工学論文集，第56巻，pp.796-800，2009。
- 3) 中村孝幸，神野充輝，久保勝太：ケーソン防波堤に組み込んだ垂下版式反射波低減工の効果，海洋開発論文集，第18巻，pp.311-315，2002。
- 4) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離法，港湾技研資料，No.248，pp.3-24，1976。
- 5) 中村孝幸，井手善彦：波の逸散現象を考慮した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法，海洋開発論文集，第13巻，pp.177-182，1997。
- 6) 佐伯信哉・中村孝幸・岡田修平：波浪エネルギーを利用した鉛直混合促進型護岸の密度成層場における効果について，海洋開発論文集，第25巻，pp.759-764，2009。