

波による渦流れを利用する遊水室型海水交換 防波堤の効果的な断面について

EFFECTIVE CROSS SECTIONS OF A WATER EXCHANGE BREAKWATER WITH WATER CHAMBERS BY THE USE OF WAVE INDUCED VORTEX FLOWS

中村孝幸¹・大村智宏²・楨本一徳³・大井邦昭⁴

Takayuki NAKAMURA, Tomohiro OHMURA, Kazunori MAKIMOTO and Kuniaki OHI

¹正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

²正会員 工修 (独立)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)

³正会員 工修 復建調査設計株式会社松山支社 (〒791-8036 愛媛県松山市高岡町26-8)

⁴正会員 工修 技研興業株式会社技術研究部 (〒193-0801 東京都八王子市川口町1540)

We have proposed a new breakwater, in which the unidirectional current is excited by the vortex flows driven by wave motions in the breakwater. It has a water chamber partly sheltered by a vertical curtain wall in front of a rear vertical wall. For deduction of mean currents due to wave induced vortex flows beneath the front curtain wall, there is a water channel on the bottom, which comprises of a submerged horizontal plate attached to the rear and side walls and the sea bottom. The new breakwater has another great advantage. It has a sufficient sheltering effect for incoming waves and also has a great deal of wave energy dissipation function to reduce reflected waves from the breakwater. In this study, we have examined effective cross sections of the new breakwater for wave sheltering as well as unidirectional current excitation.

Key Words : *Water exchange breakwater, wave transmission, wave reflection, vortex flow,
vortex induced mean current*

1. はじめに

近年、港内の水質・底質環境の改善を目的に、波浪を利用する海水交換型防波堤の整備が増えている。これら工法は、主に砕波あるいは越波による水位上昇により港外水を港内へと導水する機構を利用している。しかしながら、潮位差の影響を受けやすい導水原理であることや、副堤を必要とするなど建設コストが高くなるなどの欠点がある。このため、既に著者ら¹⁾は、従来型の導水原理を利用するのではなく、波による渦流れを利用して港内水を港外へ排水する方式の「遊水室型海水交換防波堤」を提案した。この防波堤は、異吃水2重壁式防波堤を原型として、その遊水室内に没水平版を設置した構造である。遊水室内のピストンモードの波動運動を原動力として前面壁下部付近に強い渦流れを発生させ、波動運動から渦流れへとエネルギー変換を行うと同時に、さらには没水平版による渦流れの制御により、堤体の

下部に設けた通水路を介して平均流の生成をも可能にしている。

本研究では、この遊水室型海水交換防波堤を基本形として、より効果的な断面の究明や現場に適用するときに遭遇する各種の問題点について検討を行った。具体的には、まず海水交換防波堤としての機能面に着目し、波浪制御効果・平均流生成機能に及ぼす開口幅や没水平版長さなど断面諸量の影響を明らかにする。次に、現場での利用を考えた場合、防波堤構造を重力式構造とすることが想定され、堤体後部や下部に矩形重量物を設けることで、下部通水路長が長くなることや通水路を設置する位置が水深方向に変化することが考えられる。ここでは、このような重力式構造を想定するときの影響などについても明らかにする。

2. 水理模型実験

(1) 実験条件

水理模型実験水槽は、図-1に示す3種類の2次元水路を用いた。いずれの水路も一端には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消波工あるいはヘチマロンよりなる消波工を設置した。これらの水槽は、平均流の発生による模型堤体前後の水位差をなるべく小さくするため、水路①では回流用のパイプを設けたもの、水路②では平面水槽内に擬似2次元水路を構築したもの、水路③は長水路を2分割して回流用水路を設けたものに相当する。実験で用いた水深 h は40cmを基本とし、水深の影響を検討するときのみ36cm、44cm、70cmに変化させた。入射波は、入射波高 H が5cm、7cm、10cmの3種類の規則波を用いた。周期 T は、0.95～2.2sの範囲内で複数の条件を採用した。これらの実験条件を表-1に示す。なお、表中には波長 L 、波長遊水室幅比 L/Bw を併せて示す。

(2) 模型堤体の構造諸元

図-2、3は、比較のために用いた下部通水型矩形堤と遊水室型海水交換防波堤の構造諸元を示す。こ

こでは、堤体全長 $B=81\text{cm}$ 、開口幅 $bd=8\text{cm}$ 、水平版長さ $hd=28\text{cm}$ 、後部重量物長さ $md=53\text{cm}$ 、下部マウンドなしの遊水室型海水交換防波堤（type-1）を基本形状として波浪制御効果と海水交換機能に及ぼす開口幅、水平版長さ、後部重量物長さ、下部マウンドの影響を検討した。検討に用いた堤体断面の諸量を一括して、表-2に示す。なお、以下の実験では遊水室幅 Bw は25cmと固定してある。表中に示すように、開口幅 bd は8cm（type-1）を中心に3種類に変化させた。このとき、通水部の条件を同一とするため、水平版の鉛直方向位置は固定する必要がある。開口幅の影響を検討する際には、垂下版の吃水深を固定し、水深を連動させて上昇させる場合（type-4、5）と、水深は固定し垂下版の吃水深を増加させる場合（type-2、3）の2通りについて検討した。また、水平

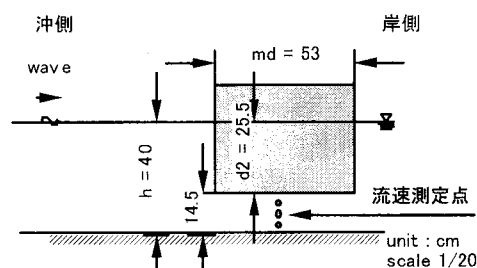


図-2 比較のために用いた下部通水型矩形堤

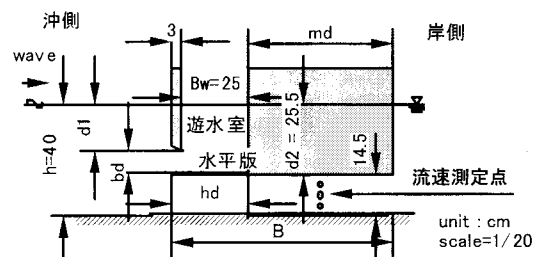


図-3 効果的な断面の検討に用いた遊水室型海水交換型防波堤

表-1 実験波条件

周期 $T(\text{s})$	波高 H $H(\text{cm})$	波長 $L(\text{cm})$	波長堤体幅比 L/Bw	沖波波長堤体幅比 L_0/Bw
水深40cm				
1.2	10	198	7.9	9.0
1.3	10	220	8.8	10.5
1.4	10	239	9.6	12.2
1.5	10	260	10.4	14.0
1.6	10	284	11.3	16.0
1.8	10	327	13.1	20.2
2.0	10	369	14.8	25.0
水深44cm				
2.0	10	384	15.4	25.0
1.8	10	340	13.6	20.2
1.6	10	292	11.7	16.0
1.4	10	247	9.9	12.2
水深36cm				
2.0	10	353	14.1	25.0
1.8	10	313	12.5	20.2
1.6	10	272	10.9	16.0
1.4	10	230	9.2	12.2
1.2	10	198	7.9	9.0
水深70cm				
1.2	10	217	8.7	9.0
1.4	10	280	11.2	12.2
1.5	10	312	12.5	14.0
1.7	10	358	14.3	17.0
1.8	10	403	16.1	20.2
1.9	10	433	17.3	22.5
2.0	10	462	18.5	25.0

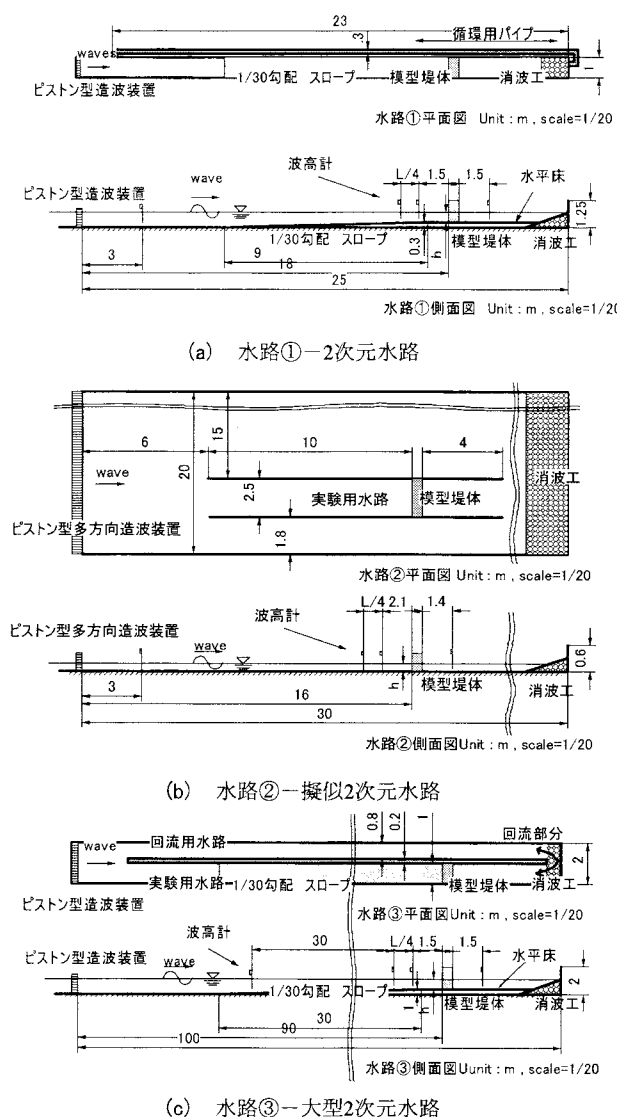


図-1 実験水槽および模型配置位置

表 - 2 遊水室型海水交換防波堤の構造諸元

形状	単位: cm						
	B	md	マウンド	hd	bd	d1	h
type-1	81	53	0	28	8	16.5	40
type-2	81	53	0	28	12	12.5	40
type-3	81	53	0	28	4	20.5	40
type-4	81	53	0	28	12	16.5	44
type-5	81	53	0	28	4	16.5	36
type-6	84	53	0	32	8	16.5	40
type-7	81	53	0	24	8	16.5	40
type-8	50	19	0	28	8	16.5	40
type-9	56	25	0	28	8	16.5	40
type-10	106	75	0	28	8	16.5	40
type-11	81	53	30	28	8	16.5	70

版長さhdは28cm (type-1) を中心に3種類に変化させた。次に、重力式構造を想定した場合に後部や下部に矩形重量物が設置されるため、通水路位置や長さが変化した場合の影響を検討した。このとき、やはりtype-1の諸元を基本形状とし、後部重量物長さmdは19cm～75cmの範囲で4種類に変化させた。また、下部矩形体マウンドの設置の有無についても検討した、このとき、前面垂下版の吃水深、開口幅、水平版長さについては基本形状の諸元と同一にした。これら11種類の模型堤体の模型縮尺は、いずれも1/20程度を想定した。

(3) 計測方法

a) 波変形の計測

本実験では、波変形の測定には容量式波高計を4台用い、図-1のように設置した。模型堤体の沖側には、入射波測定用に1台、入・反射波の分離用に2台、堤体模型の透過側には透過波測定用に1台を設置した。なお、反射波の推定には、入・反射波の分離推定法²⁾を用いた。

b) 流速の計測

通水路の流速の計測には、電磁流速計を3台用い、図-2, 3のように設置した。このとき、通水路全体の平均流速は、各測定点にその代表長を考慮して近似的に求めた。また、表面流速の測定にはフロートを用いた。フロートは直径約5cmのゴムボールであり、流れに追従しやすいようにとボール内には水を注入して比重を1に近づけた。実験では、これを約20個堤体前面に投入し、水槽の鉛直上方に設置したビデオカメラで撮影し、画像解析を行った。

平均流の観測に際しては、定常状態下での流速や流況が把握できるように造波開始後から120s経過後を解析対象とした。一方、通水路流速の電磁流速計を用いた解析には、反射波が十分に混在し、波浪場がそれ以上変化しない状態として、再反射波が模型堤体と造波機間を2往復した後のものを解析対象とした。

3. 数値計算の方法

本研究では遊水室型海水交換防波堤による波変形の算定には、中村・井出²⁾により展開されている線

形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論を用いた。この算定法は、カーテン防波堤など隅角部を有する構造物を対象として、鋭角部よりの流れの剥離や渦流れの発生現象によるエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、線形減衰を有する流体を想定している。このとき、線形減衰係数は従来の研究¹⁾を参照して0.2とした。

4. 結果および考察

(1) 効果的な断面について

海水交換防波堤の波浪制御効果および海水交換機能は、垂下版の下端部で形成される渦流れによるエネルギーの逸散と密接に関係していると考えられている。そこで、垂下版下部の開口幅やその吃水、水平版の長さなどに着目して波浪制御効果および海水交換効果を検討した。

a) 各種断面諸量を変化させたときの海水交換効果

図-4, 5は下部通水型矩形堤と遊水室型海水交換防波堤(type-1)の表面流況の時間的な変化をストロボ写真風に示す。図中には画像解析による平均表面流速の実験結果も併せて示す。このとき、平均表面流速は、進行波の静水面位置での水平流速振幅($=pH/T \cdot \coth(kh)$)で除した無次元流速 U^* で示す。この図に見られるよう、フロートの動きにばらつきが大きいため、定量的な検討は難しいが、定性的には明らかに遊水室型防波堤が下部通水型矩形堤に比較して有意な大きさの平均流を冲向きに発生していることなど海水交換効果を有することが確認できる。

図-6は下部通水型矩形堤および遊水室型海水交換防波堤type-1, 2, 3の通水路において計測した水平流速から算定した無次元輸送流量 Q^* を示す。 Q^* は平均流速にそれぞれの代表長を乗じたものを単位幅輸送流量 Q として算定し、進行波による半周期間の

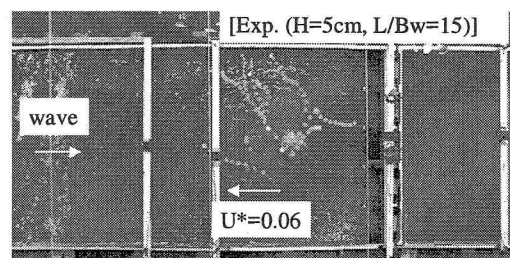


図 - 4 下部通水型矩形堤の流況

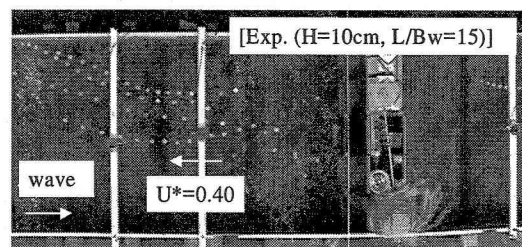


図 - 5 遊水室型海水交換防波堤(type-1)の流況

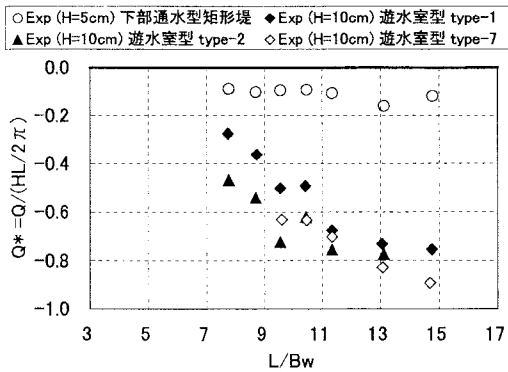


図-6 各種断面諸量を変化させたときの輸送流量 Q^*

移動水塊量 $HL/2p$ で除した。図中では、この Q^* の L/Bw （波長遊水室幅比）の変化で示す。ここでは冲向きへの流れを負と定義している。この図からも、波による渦流を利用する遊水室型防波堤は、1波あたりの無次元平均流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れることがわかる。この海水交換機能は、従来の下部通水型矩形堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。一方、遊水室型防波堤type-1, 2, 7について比較すると、いずれも長周期に移行すると輸送流量が大きくなり、 L/Bw が10以上ではそれ以上増加しない傾向がみられる。両者を比較すると、ほぼ全ての周期帯においてtype-2, 7の方が1~2割程度大きいことがわかる。これは、遊水室型防波堤の平均流生成機能はピストンモード波浪共振により遊水室内および堤体前面に形成される渦流の影響を強く受けるため、遊水室内で形成された渦流が効率的に堤体前面に移動できるような構造形式とすることで輸送流量が増加することによるものと考えられる。

b) 開口幅を変化させたときの波浪制御効果

図-7, 8, 9は、type-1, 2, 3の反射率 Cr 及び透過率 Ct の実験結果と算定結果を示す。図中では周期を表す無次元量として L/Bw が用いてある。これらの図より、type-1の実験結果は算定結果と定性的、定量的にもほぼ一致することがわかる。しかしtype-2, 3では、算定結果と差異がみられる。type-2は反射率 Cr が、定性的には一致するものの、定量的には、算定結果が大きくなっている。type-3は、実験結果において反射率 Cr は極小値を示さず、その反射率 Cr も大きな値を示す。透過率 Ct は、定性的には一致するものの、やはり実験結果の方が大きくなる傾向にある。これは、垂下版下部の開口幅が狭すぎると遊水室内に流体が流入しにくくなり、明確なピストンモード波浪共振が発生しにくくなることによると考えられる。type-1, 2の実験結果を比較すると、有効周期帯が多少異なるものの、広い周期帯にわたり反射波を低減することが可能であり、反射率 Cr もほぼ同程度の大きさであることがわかる。透過率 Ct に関してはいずれの場合においても、実験結果、算定結果ともに透過波の低減効果は同程度であると言える。

一方、前面垂下版の吃水を固定して開口幅を変化させる場合(type-4, 5)についても、上記した吃水を変化させる場合と同様の傾向を示すことが明らかとなった。

c) 水平版長さを変化させたときの波浪制御機能

図-10, 11は、type-6, 7の反射率 Cr 及び透過率 Ct の実験結果を示す。図中では周期を表す無次元量として L/Bw の変化で示し、対応する条件における算定結果を併せて示す。ここで、比較のためのtype-1の実験結果は上記した図-7である。これらの図より、type-7の実験結果は、算定結果と定性的にほぼ一致することがわかる、しかし、type-6は、実験結果において反射率 Cr は明確な極小値を示さず、特に短周期側においてその反射率 Cr も大きな値を示す。これは、水平版を延長したことにより、水平版の上下で

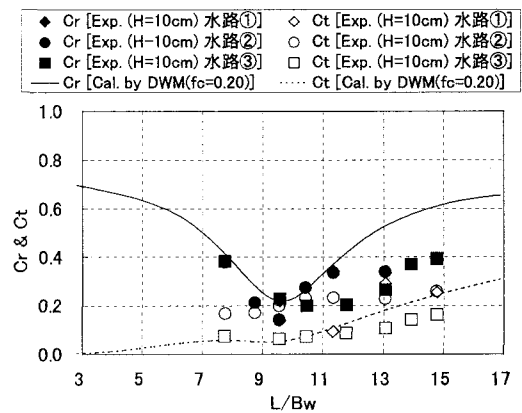


図-7 遊水室型type-1の反射率 Cr 、透過率 Ct

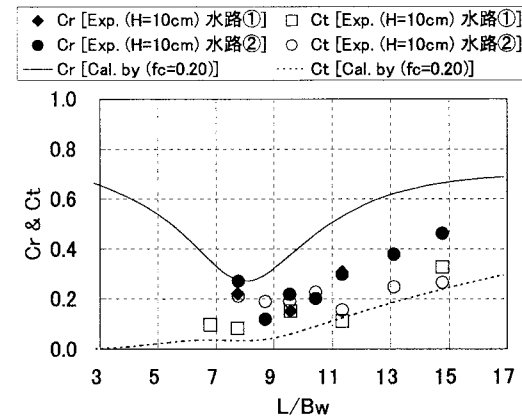


図-8 遊水室型type-2の反射率 Cr 、透過率 Ct

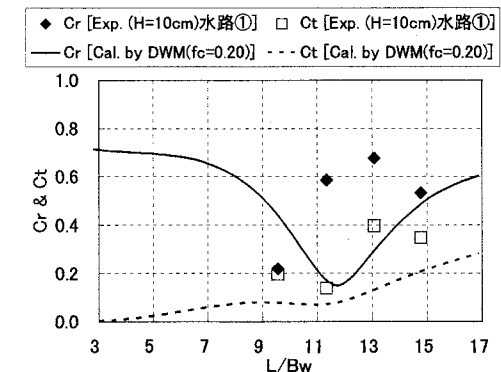


図-9 遊水室型type-3の反射率 Cr 、透過率 Ct

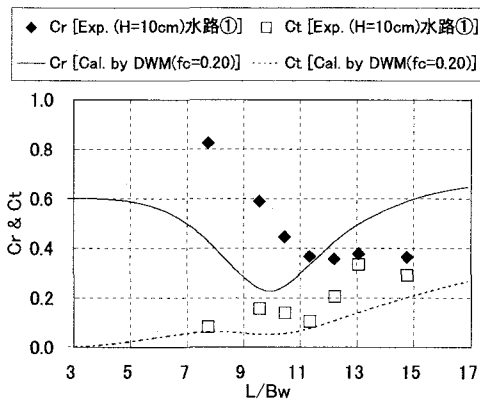


図 - 10 遊水室型type-6の反射率Cr, 透過率Ct

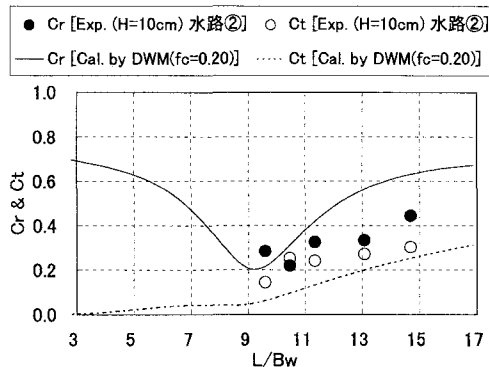


図 - 11 遊水室型type-7の反射率Cr, 透過率Ct

下部通水路と不透水の単一垂下版式反射波低減工という2つの構造物に分断されてしまうような形状となっているため、ピストンモード波動運動の特性が算定結果と大きく異なると考えられる。type-1, 7の実験結果を比較すると、反射波の低減を可能とする有効周期帯を含め、低減特性はほぼ同様な結果となった。

透過率Ctに関しては、いずれの場合においても長周期側に移行するにつれて大きくなる傾向にある。また、type-1, 6, 7の比較から、水平版長さを長くするほど透過波はより低減できる傾向にあることがわかる。このような傾向は、特に実験結果で顕著であり、これは水平版を延長することで流体の鉛直運動がより広い面積で拘束されるためと考えられる。

(2) 通水路長さ・通水路位置の影響

実際場において、海水交換防波堤の防波堤構造を重力式構造とすることを想定すると、矩形重量物を後部や下部に設置することとなり、その際に、下部通水路長さや、あるいは通水路位置が変化することとなる。ここでは、通水路長さと通水路位置の波浪制御効果および海水効果機能におよぼす影響について検討を行う。

a) 波浪制御機能に対する影響

図-12, 13は、type-9, 10の反射率Cr及び透過率Ctの実験結果を示す。図中では周期を表す無次元量として L/Bw の変化で示し、対応する条件における算定結果を併せて示す。ここで、比較のためのtype-1の実験結果は上記した図-7である。これらの図より、

反射率Crについて各条件の実験結果とともに、算定結果と定性的には一致するものの、定量的には特に長周期側において算定結果の方が大きな値を示すことがわかる。透過率Ctの実験結果はいずれの条件についても、定性的、定量的に良好な一致がみられ、その低減効果も十分なものである。各条件について実験結果を比較すると、いずれの条件においても、反射波の低減効果は同程度であることがわかる。これは、反射波の低減効果に影響をおよぼすと考えられる前面垂下版吃水深や遊水室幅などの条件は、ここでは同一な条件となっているため、ほぼ類似した特性を示すものと推定される。透過波の低減効果については、実験結果、算定結果ともに、重量物長さを長くすると透過率Ctは小さくなる傾向にある。これ

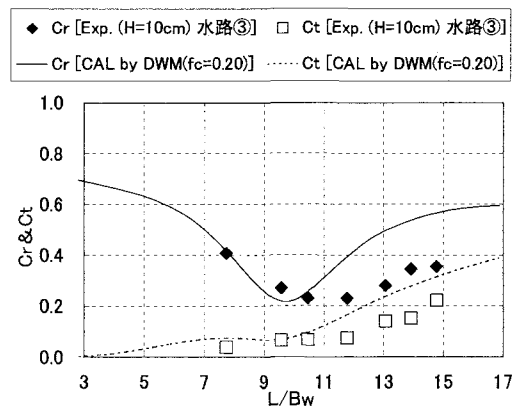


図 - 12 遊水室型type-9の反射率Cr, 透過率Ct

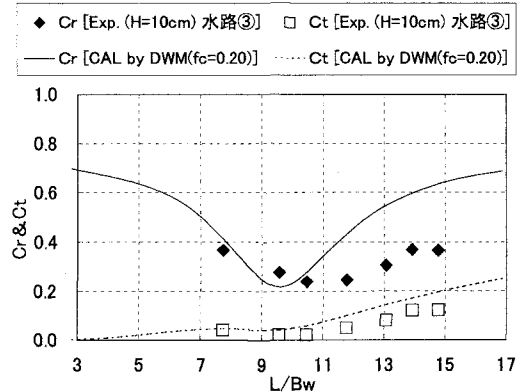


図 - 13 遊水室型type-10の反射率Cr, 透過率Ct

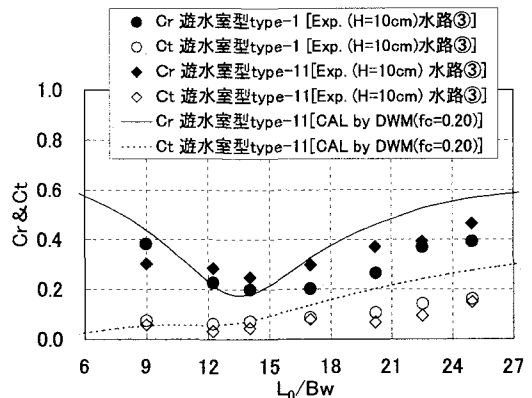


図 - 14 遊水室型type-11の反射率Cr, 透過率Ct
(沖波波長遊水室幅比による変化)

は、水平版長さの影響と同様に、重量物の長さを大きくすることにより、流体の鉛直運動が拘束され、透過率 C_t が小さくなるものと考えられる。

図-14は、type-11の反射率 C_r 及び透過率 C_t の実験結果と算定結果を示す。図中には比較のためのtype-1の実験結果についても併せ示す。これらの図より、type-11の反射率 C_r の実験結果は、算定結果に見られるような特定の L_0/Bw （沖波波長遊水室幅比）の条件において極小値を示す傾向が顕著に見られない。これは、下部に設置したマウンドの影響により水深に対する不透過部の割合が増大するため、渦によるエネルギー逸散よりもその影響がより強く現れることによるものと推定される。一方、透過率 C_t については定性的、定量的に実験結果と算定結果は一致することがわかる。type-1, 11の実験結果を比較すると、やはり、type-11の方が反射率 C_r が多少大きくなることがわかる。透過率 C_t は、実験結果と算定結果ともに、いずれの場合においても長周期側に移行するにつれて大きくなる傾向にあり、絶対値についても有意な差異は見られない。

b) 海水交換効果に対する影響

図-15は、type-1, 9, 10の通水路において計測した水平流速から算定した輸送流量 Q^* を示す。図中ではやはり沖向きへの流れを負と定義し、 L/Bw の変化で示す。type-1, 9, 10ともに長周期に移行すると輸送流量 Q^* が大きくなり、 L/Bw が10以上では流量の増大が緩やかになる傾向がみられる。両者の実験結果を比較すると1割以内の差異となっており、通水路長を増減しても、平均流の生成には影響を及ぼさないものと推定される。これは、このときの各条件の前面垂下版吃水深や遊水室幅、開口幅などの条件が同一条件となっているため、形成される渦の循

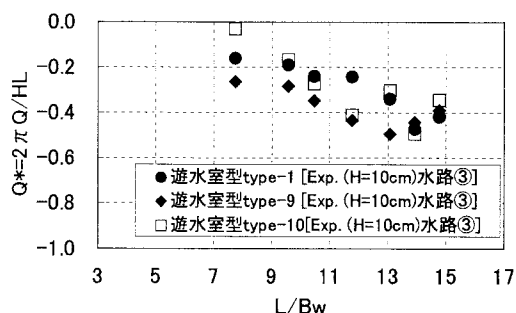


図-15 後部重量物長さを変化させたときの輸送流量 Q^*

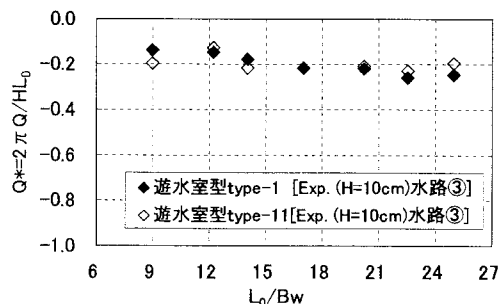


図-16 下部マウンドを設置した場合の輸送流量 Q^*
(沖波波長遊水室幅比による変化)

環量や渦の移動特性などが変化しないことによるものと考えられる。

図-16は、type-1, 11の通水路において計測した水平流速から算定した輸送流量 Q^* を示す。図中ではやはり沖向きの流れを負と定義し、 L_0/Bw の変化で示す。このとき、 Q^* の算出にも沖波波長 L_0 を用いた。この図より、マウンドの有無による平均輸送流量の差異はほとんど見られず、マウンドを設置して通水路位置を変化させても、平均流の生成に影響を及ぼさないと言える。そして、任意水深の海水を交換できるという可能性を考慮すれば実際場への適用性は拡大したと考えられる。

5. まとめ

(1) 波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤は、一波当りの無次元平均輸送流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れる。この海水交換機能は、従来の海水交換防波堤である下部通水路型矩形堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。

(2) 遊水室型防波堤では、遊水室内で形成される渦流が効率的に堤体前面に移動できるような構造形式とすることで輸送流量を増大させることができる。具体的には、垂下版下部の開口幅や、水平版長さなどである。一方、垂下版吃水深や没水平版の長さを変化させると、波浪制御効果も変化する。例えば、没水平版は、その長さを短くすると透過波の制御効果が低下する。また、垂下版吃水深は反射波の低減効果に影響をおよぼし、吃水深を浅くすると反射波低減効果が低下する。

(3) 重力式構造を想定して堤体下部や後部に重量物を設置しても、渦の形成には影響はおよぼさないため、輸送流量は変化しない。すなわち、通水路位置を水深方向に変化させ、任意水深の海水を交換することができる。一方、後部重量物長さを延長することで、透過波をさらに低減することができる。

参考文献

- 1) 大村智宏, 中村孝幸, 大井邦昭, 中山哲蔵: 下部通水路型海水交換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, Vol. 19, pp.547-552, 2003.
- 2) 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・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 3-24, 1976.
- 3) 中村孝幸, 井出善彦: 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, Vol. 13, pp. 177-182, 1997.