

海水導入型の遊水室型海水交換 防波堤の開発とその効果

DEVELOPMENT AND EFFECTIVENESS OF A WATER EXCHANGE
BREAKWATER OF INTAKE TYPE WITH A WATER CHAMBER.

中村孝幸¹・村上寛洋²

Takayuki NAKAMURA and Tomohiro MURAKAMI,

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3番)

²学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

For solving the water pollution problem in a semi-enclosed harbor, a sea water exchange breakwater with a water chamber has been developed. A newly developed water exchange breakwater is a water intake type through the use of wave induced vortices about the breakwater. The breakwater has a water chamber bounded by a curtain wall in front and a rectangular caisson on the rear. There is a submerged water channel under the caisson to transport the sea water to harbor from outer sea. Firstly, the generation mechanism of the water intake by the breakwater has been examined experimentally. Wave transmission and reflection characteristics of the breakwater were also clarified extensively in addition to the water exchange function. It has been clarified that the piston mode wave resonance in the water chamber plays an important role to induce mean currents about the breakwater and also to reduce the reflected waves from the breakwater.

Key Words : *Water chamber, water intake type breakwater, piston mode wave resonance, low reflection, low transmission*

1. はじめに

防波堤など港湾の外郭施設は、港内の静穏度を第一目標として計画されることが多い。しかしながら、静穏度を求めるあまり、港内外の海水交換が抑止され、港内の水質悪化が問題視される場合も見られる。このため、その対策法として透過性防波堤や海水交換防波堤の利用が試みられている。

既に著者ら¹⁾は、従来の越波現象を利用する海水交換防波堤に代わり、垂下版と水平版で構成される、遊水室型海水交換防波堤を提案し、その有効性などを明らかにしてきた。この防波堤は、遊水室のピストンモード波浪共振を利用して強い渦流を発生させ、渦流と水平版との干渉作用により冲向きに平均流を引き起こす港内水排出型の海水交換防波堤である。

しかし、この防波堤の構造は、水平版が付加的に必要ななど、耐波設計や現地施工で複雑になりやすい面がある。この問題点を改善するべく研究を進めたところ、新しい事実を発見した。まず水平版を取り除くことで、平均流が従来とは逆向きの岸向きに発生すること。さらに垂下版も取り除くと、平均流は発生しなくなるなどである。

そこで本研究は、従来構造より没水平版を取り除

き、垂下版と底部に通水路を持つ背後重量物のみで構成される防波堤を新型構造と位置づけ、その平均流発生機構や消波機能を従来型との比較により明らかにする。遊水室型構造に限定したのは、遊水室内のピストンモード波動運動を原動力として利用できれば、渦流れの生成に伴う高い消波機能や曝気・混合作用が期待できると考えたからである。

2. 実験概要

(1) 実験水槽

本実験では、図-1 に示す愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ30m、幅1m、高さ1.25mの1次元水槽を用いた。この水槽の一端にはピストン型造波装置が、他端には、再反射を防ぐために砕石およびヘチマロンよりなる消波工を設置してある。水路内には1/30勾配の不透過な斜面を設け、この背後には斜面に接続するように水平床を設置してある。後述する模型堤体は、図中に示すようにこの水平床上に設置した。また、平均流の発生により模型堤体の前後において水位差が生じないようにするため、消波工側および水平床の沖側の端部同士で回流できる水路構造とした。具体的には、図中に示すように水槽

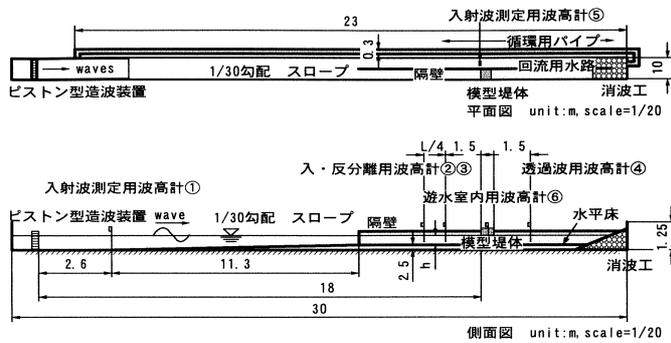


図-1 実験水槽及び模型配置位置

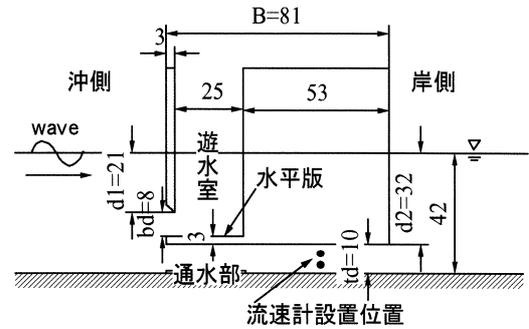


図-2 従来型の模型堤体

幅 0.5m の位置に、隔壁を設置して主水路と回流用水路を設け、平面的な循環流れを阻害しないように工夫した。

(2) 模型堤体の構造諸元

図-2は従来型の排水方式の海水交換防波堤を示す。これは、中村ら¹⁾により用いられている模型防波堤とほぼ同一形状であり、遊水室の底部に没水平版が設けてある。

図-3は、従来型の堤体より水平版を取り除いた構造にほぼ相当する。新規に用いた堤体で、本研究での基本構造とした。この堤体の全長は $B = 81\text{cm}$ と従来型と同じであるが、その他の寸法については、構造的な相違もあり、概略的な対応しか取れていない。

実験では、基本構造の堤体において、通水部高さ td を 5cm, 10cm と変化させた場合についても検討した。このとき、遊水室前面の開口長および前面垂下版の吃水深は、 td と連動する形式で変化させた。

また、垂下版吃水深 $d1$ の影響の検討には、図-3において前面垂下版の吃水深 $d1$ のみを 34.5cm に延長した堤体を用いた。

一方、図-4は、基本形状から垂下版を取り除き、下部透過型矩形堤とした堤体を示す。

表-1は、これらの用いた断面諸元を一括して示す。

(3) 実験条件

実験で用いた水深 h は 42cm を基本とした。作用波は規則波として、その周期 T は、0.8~2.2s の範囲内で 13 種類、入射波高は 5cm, 10cm の 2 種類とした。採用した周期条件を波長・堤体幅比 L/B で示すと、これらは 2.4~7.1 の範囲にある。

(4) 計測方法

本実験では、6 台の容量式波高計を図-1 に示すように設置した。具体的には、沖側における入射波の測定用に 1 台、入・反射波分離用に 2 台、模型堤体の背後の透過波測定用に 1 台、堤体真横の別の水路での入射波測定用に 1 台、遊水室内の波高測定に 1 台、計 6 台を使用した。

ここで、反射率は、合田ら²⁾による入・反射波の分離推定法を用いて求めた。また、通水部の流速は、

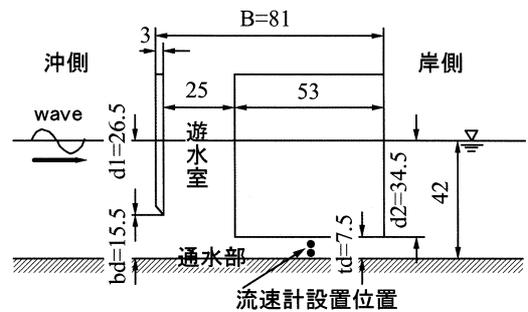


図-3 基本形状の模型堤体

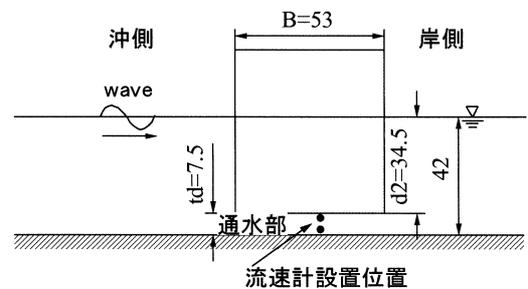


図-4 下部透過型矩形堤

表-1 各実験における断面諸元

	堤体長 B (cm)	開口長 bd (cm)	通水部高さ td (cm)	垂下版吃水深 $d1$ (cm)	背後重量物 吃水深 $d2$ (cm)
従来型	81	8	10	21	32
CASE01	81	13	5	29	37
CASE02	81	15.5	7.5	26.5	34.5
CASE03	81	18	10	24	32
CASE04	81	7.5	7.5	34.5	34.5
CASE05	53	-	7.5	-	34.5

鉛直断面内の2方向の流速が同時に測定可能な電磁流速計を1台ないし2台用いて計測した。設置状況は、図-2~4に示す通りである。このとき、通水部全体にわたる平均流速や輸送流量は、各測定点に、その代表長を考慮して近似的に求めた。なお、平均流速は、作用波の波数にして10波程度を目安にしてその時間平均値で代表させた。

3. 平均流の発生機構

(1) 従来型

従来型の平均流発生機構は、遊水室内でのピストンモード波動運動により形成された強い渦流が要因として指摘されており³⁾、波1周期間で平均すると結果的に沖側へ輸送されるものと考えられている。図-5に流況観測の結果より考察された平均流の発生機構³⁾を示す。なお、短周期側では、遊水室からのジェット流の流出強度が弱いため、通水部の流体はほとんど影響を受けず、平均流の発生が弱いため、結果的に海水交換量は少なくなる傾向にある。

(2) 新規型

新規の海水交換防波堤による平均流の発生機構も、ピストンモード波動運動が原動力になるが、水平版が存在しないため、平均流が岸向き方向に発生する。以下この機構の概略について、流況の時間的な変化と併せて紹介する。

①遊水室内のピストンモード波動運動の生起に

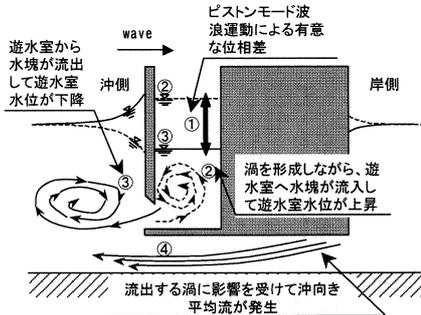
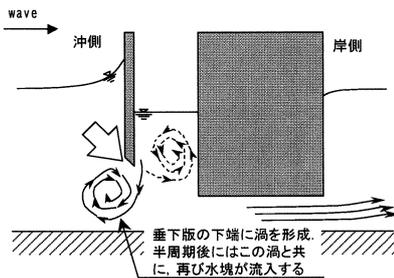
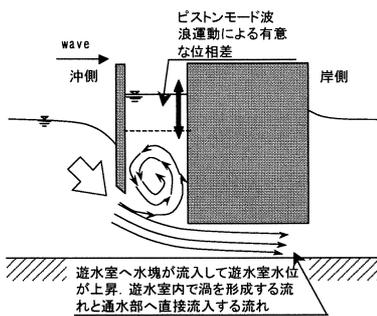


図-5 従来型の平均流発生機構



a) 押し波時



b) 引き波時

図-6 新規型の平均流発生機構

より垂下版前後での水位変動に有意な位相差が生じる。

②押し波時では、開口部から遊水室内へ水塊が流入する。ここで、水平版を有する従来型との違いが生じる。流入する一部は、遊水室の上部へ向かい水位が上昇し、図-6 a) に示すように反時計方向回転渦が発生する。それ以外は、通水部へ流入して岸向き方向への流れを引き起こす。

③引き波時では、遊水室から水塊が流出する。同時に遊水室内では水位が下降し、図-6 b) に示すように垂下版下部に時計方向回転渦が発生する。ここでも、従来型との違いが生じる。発生した渦は、垂下版に沿って移動するが、水平版がないため垂下版の下端付近に停留しやすい。

④上記の③で発生した渦の上端を通るように次の押し波が開口部へ流入する。この流れは、次第に渦も巻き込み通水部へ流入するので、平均流が途絶えないものとなり、より強化される。

4. 結果および考察

(1) 従来型と新規型堤体の比較

従来型と新規型の波浪制御効果および海水交換量を比較検討する。従来型との比較に用いた新規型の模型堤体は、通水部高さ td が10cmの堤体 (表-1中のCASE03) である。

図-7は両堤体の反射率 Cr および透過率 Ct の実験結果と算定結果を、周期を表すパラメータとして L/B (波長堤体幅比) による変化で示す。

Cr の実験結果に着目すると、両堤体共に算定結果と定性的にはほぼ一致することが分かる。また、 Cr が極小値を示す有効周期帯は、水平版を取り除いた新規型では、 L/B の小さな短周期側に移行している。これは、水平版を取り除くことで、遊水室内の水深が深くなり、ピストンモード波浪共振を示す波長・遊水室幅比が小さくなるためと考えられる。

次に Ct の実験結果に着目すると、両堤体共に算定結果と定性的、定量的にはほぼ一致することが分かる。そして、新規型の Ct は L/B が2.5付近から従来型より大きくなる傾向にある。これは、押し波時に遊水室へ流入する水塊の一部が、通水部へ直接流入することに起因するものと考えられる。

図-8は、両堤体の海水交換量 Q の結果を L/B (波長堤体幅比) による変化で示す。このとき海水交換量は、波一周期当りの輸送流量 (単位幅当り) を、進行波による半周期間の移動水塊量 $HL/2\pi$ で除した無次元量 Q^* で表す。これより、従来型では長周期側で沖向き方向に有効な海水交換が行なわれているに対して、新規型では短周期側において岸側に向かって有効な海水交換がなされ得ることが分かる。

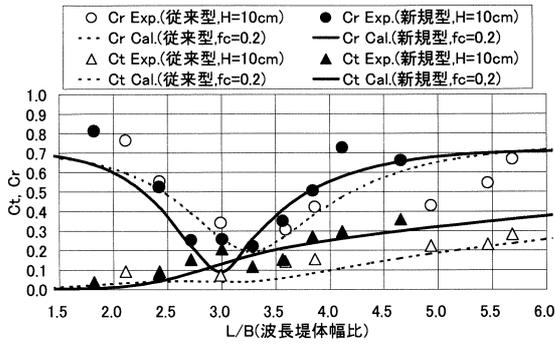


図-7 従来型と新規型の波浪制御効果の比較

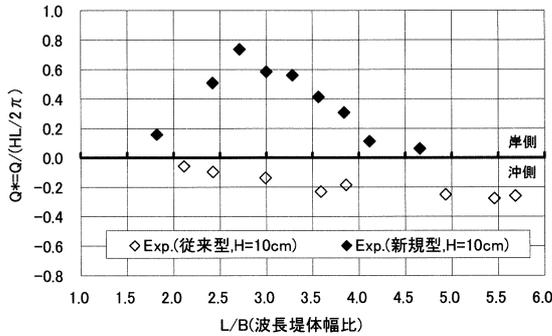


図-8 従来型と新規型の海水交換量の比較

ここで、海水交換量の絶対値を比較すると、新規型は従来型の約2倍程度の値を示すことが確認される。そして、新規型の堤体では、長周期側で海水交換量が低下する傾向にある。これは平均流の発生機構図-6 b) で示した、垂下版下端より沖側に発生する時計方向回転渦が大きく発達して、沖側方向へ掃き出だされるためである。

(2) 新規型堤体の断面諸元の影響

a) 通水部高さ td

ここでは、通水部高さ td の波浪制御効果および輸送流速、海水交換量に対する影響を検討する。ただし、通水部高さの変化に連動して、前面垂下版の吃水深も変化しており、厳密な意味では通水部高さだけの影響ではない。

図-9、10は、反射率 Cr および透過率 Ct の td による影響を L/B (波長堤体幅比) による変化で示す。 Cr に着目すると、 td に関係なく算定結果と定性的、定量的にほぼ一致する。ただし、短周期側では両結果の一致度は十分でない。これは、短周期側では反射波が増大しやすく、砕波性の波になりやすいため、入・反射波の分離推定が正確に行われなかったことが原因と考えられる。そして、 Cr が極小値を示す有効周期帯は td が狭くなるにつれ、 L/B の大きな長周期側に移行することが分かる。これは、 td が狭くなると、垂下版の吃水深が深くなることが一因と考えられる。

一方、 Ct に着目すると、実験結果と算定結果は

ほぼ一致することが分かる。そして、長周期側になると、 td が広がるほど、 Ct が増加する傾向が見られる。しかし、この td による Ct の差は大きくても0.1程度で、有意なものではない。

図-11は、平均輸送速度 U への td の影響を検討した結果を示す。このとき、輸送速度は通水部で求めた平均流速を、進行波の静水面位置での水平流速振幅に比例する量 $\pi H/T$ で除した無次元量 U^* で示す。この図より、 td の変化に関係なく岸向き方向に平均流が発生しており、また Cr が極小値をとる有効周期帯で U^* が極大値を示す傾向にある。これは、輸送平均流速と反射率が密接な関係にあることによるものと考えられる。さらに、各 td の U^* を比較すると、 td が広がるほど小さくなる傾向が認められる。これは、 td が広がることで流速の絶対値が低下するためと考えられる。

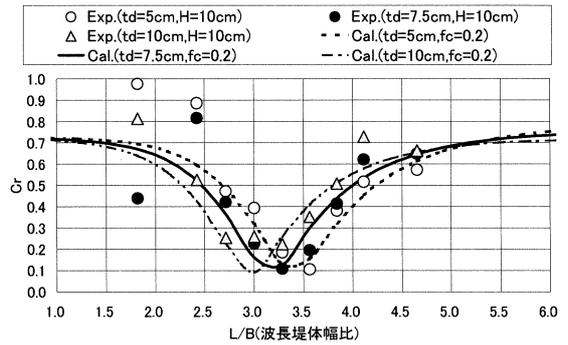


図-9 通水部高さの反射率への影響

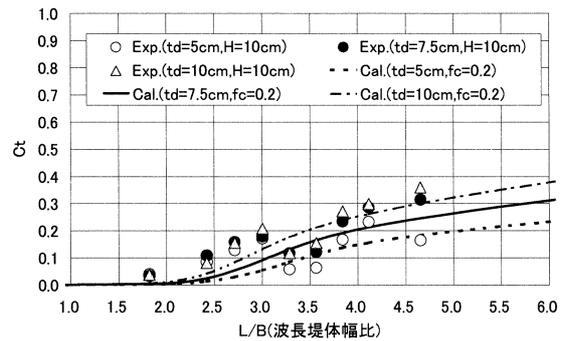


図-10 通水部高さの透過率への影響

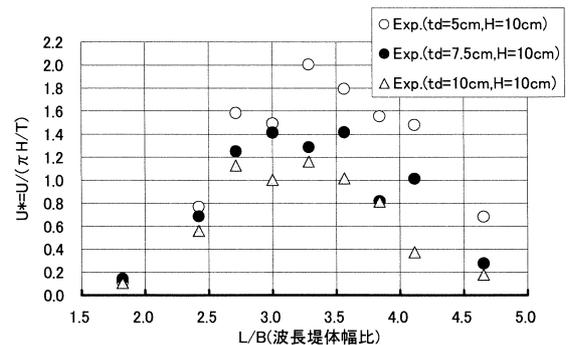


図-11 通水部高さの平均輸送速度への影響

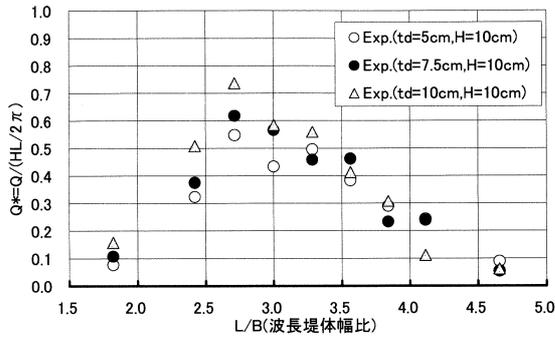


図-12 通水部高さによる海水交換量への影響

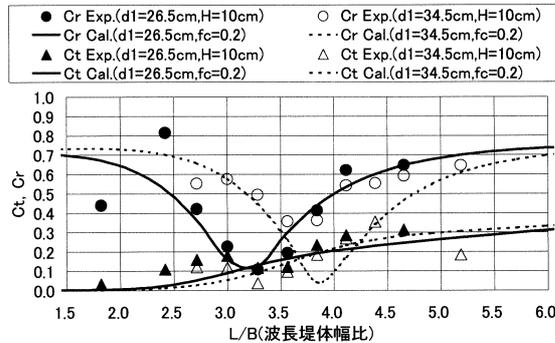


図-13 垂下版の吃水深による波浪制御効果への影響
(表-1内のCASE02とCASE04の比較)

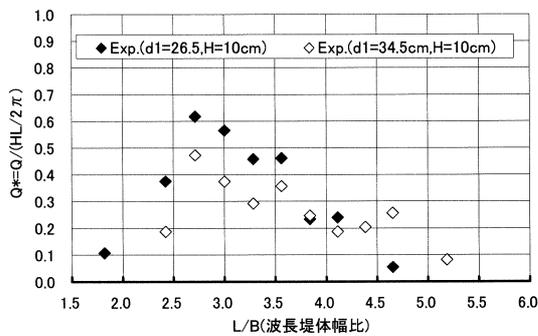


図-14 垂下版の吃水深による海水交換量への影響
(表-1内のCASE02とCASE04の比較)

図-12は、海水交換量 Q に及ぼす td の影響を L/B (波長堤体幅比)による変化で示す。これより、 Q の絶対値が最大となる周期条件などは、前述の輸送速度と同様の傾向にあることが確認できる。そして、輸送流量は、通水部高さに伴い多少ながら増加するものの、その影響は有意なものでない。

b) 垂下版の吃水深 d_1

ここでは、基本形状の堤体(表-1中のCASE02)において、前面垂下版の吃水深 d_1 のみを34.5cmと深くしたときの波浪制御効果および海水交換量について検討する。

図-13は、このときの反射波 Cr および透過率 Ct の結果を示す。図中には、比較のため、基本形状の堤体の結果についても併せ示す。この図より、垂下

版を延長すると、反射率の低下する有効周期帯は長周期側へ移行することが確認される。これは、垂下版の延長による遊水室内水塊の増大によるものと考えられる。また、垂下版を延長すると Cr の実験値が、算定値より増大している。これは、垂下版を延長することで開口長 bd が狭くなり不透過堤に近づくため、遊水室内に水塊が流入しにくくなり、明確なピストンモード波浪運動が作用しなくなるためと考えられる。

一方、透過率 Ct は、垂下版の延長によりほとんど変化せず、透過率は主に通水部の高さや背後重量物の長さに影響されるものと推測される。

図-14は無次元輸送流量 Q^* の d_1 による変化を検討した結果である。垂下版を延長しても、やはり岸向き方向に海水交換が行なわれることや、長周期側よりも短周期側で海水交換量が增大することが確認できる。また、垂下版を延長することで長周期側でも交換量の絶対値が若干ながら増大する傾向が認められる。このことから、垂下版の吃水深を通水部の天井付近まで延長しても有意な海水交換機能が期待できることが分かる。今後は、垂下版の吃水深を逆に浅くするときの影響についても検討していきたい。

(3) 下部透過型矩形堤(垂下版の除去)

ここでは、基本形状から垂下版を取り除いた、下部透過型矩形堤(以下、矩形堤)の波浪制御効果および海水交換量に対する影響を検討する。この際、通水部高さは7.5cmに固定して行った。

図-15はこの矩形堤の反射波 Cr および透過率 Ct の実験結果と算定結果をそれぞれ示す。図中には、比較のため基本形状の新規型堤体の結果についても示す。このとき、図中の横軸には、周期を表すパラメータとして新しく L/md (波長背後重量物幅比)を用いた。これは、両堤体模型で共通な寸法が背後重量物幅 md であることによる。

図-15より、この矩形堤の Cr 、 Ct の実験結果と算定結果は定性的にも定量的にもほぼ一致することが分かる。そして、垂下版を取り除くと不透過堤に

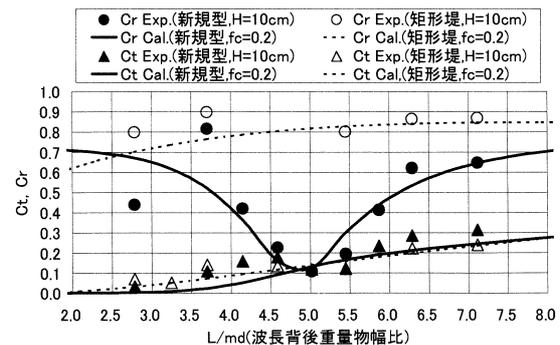


図-15 新規型と矩形堤の波浪制御効果の比較

近づき、遊水室による波エネルギーの逸散作用がなくなるため、 C_r は極度に増加することが分かる。しかしながら、 C_t については背後矩形堤の下部に設けた通路の影響が強いためか、両堤体で有意な差は見られない。

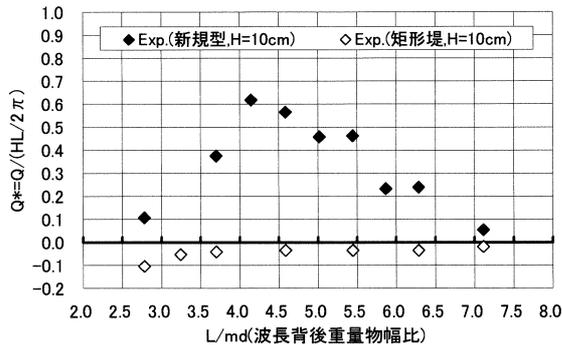


図-16 新規型と矩形堤の海水交換量の比較

次に、図-16は、下部透過形矩形堤の海水交換量を示すもので、比較のためやはり基本形状の新規型堤体の結果についても併せ示す。この図より、垂下版を除去して遊水室をなくすと、海水交換量は極端に低下することや、微量ではあるが冲向きへ輸送流量が発生することなどが認められる。

このように、垂下版一枚を取り付けるだけであるが、遊水室構造にすると、反射波が大幅に減勢されることや、垂下版まわりの渦の発生により岸向きへの平均流が有意な大きさで現れるようになることなどが見出された。

6. まとめ

以上、本研究では、従来型の波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の断面に簡単な変更を加えることにより、海水導入型の海水交換防波堤になることや、その原理などについて検討してきた。これらの検討結果をとりまとめると、以下のようなになる。

(1) 従来の港内水排出方式の遊水室型海水交換防波堤から水平版を取り除くと、遊水室内に蓄積される一方向への回転渦流と垂下版の下端部よりの剥離渦の干渉作用により、岸向き方向への平均流が発生し、

いわゆる海水導入型の遊水室型海水交換防波堤が構築できる。

(2) 海水導入型の遊水室型海水交換防波堤では、従来の港内水排出方式の遊水室型海水交換防波堤に比較すると、比較的短周期の通常波浪の条件下において海水交換量が増大する傾向にある。そして、海水交換量は、前面垂下版の吃水深に左右されやすく、垂下版の吃水深を比較的深く設定することで、有意な海水交換量が期待できる。

(3) 新規に開発した海水導入型の堤体は、従来の遊水室型海水交換防波堤と同様に反射波を効果的に低減できる。ただし、その有効周期帯は、没水平版がないため、多少ながら短周期側に移行する。また透過率は、従来型と同じ通水部高さに設定すると増加する傾向にあり、通水部を狭くすることで対処できる。その際、輸送流速は増大する傾向にあるが、通水部断面積は減少するため、全体的な海水交換量は多少ながら低下する。

(4) 従来において、直立堤の下部に通水部を設けて海水交換機能を付加する工法が用いられているが、このような工法では波の作用による海水交換機能はほとんど期待できない。これを改良する工夫として、堤体前面に垂下版を設けると、反射波の低減機能および海水交換機能が有意に現われるなど非常に効果的である。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 中山哲蔵, 大村智宏, 楨本一徳, 兼貞透: 遊水室型海水交換防波堤の効果に及ぼす通水部構造と基礎マウンドの影響について, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 736-740, 2006.
- 2) 合田良美, 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・大村智宏・大井邦昭: 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, 第50巻, pp. 806~810, 2003.
- 4) 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.