

外海水導入方式の遊水室型海水交換防波堤の効果的な断面について

EFFECTIVE CROSS SECTION OF AN INTAKE TYPE WATER EXCHANGE BREAKWATER WITH WATER CHAMBERS

中村孝幸¹・村上寛洋²

Takayuki NAKAMURA, 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)

Effectiveness of an intake type water exchange breakwater has been examined from both the theoretical and experimental points. Especially, focusing on the gap spacing under the front curtain wall, wave transmission and reflection characteristics, and the water exchange function of the breakwater were clarified. By comparing the present type and the previous discharge type water exchange breakwaters, hydraulics properties of the present type has been discussed. It was found out that the intake type breakwater was effective for water exchange under the nominal wave conditions, typically low wave height and short wave period. It is recommended that the gap spacing under the front curtain wall should be about two times as large as or less than the submerged water channel height.

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

1. はじめに

港内の静穏化, 特に異常時波浪の作用下における静穏化の確保のため, 防波堤など外郭施設が整備されてきている. そして, 暴浪時の波浪条件が厳しい港になるほど, 重厚な外郭施設が必要とされるため, 港湾内外の海水交換が阻害されやすい状況にあると考えられる. このような状況を改善するため, 透過性防波堤や海水交換防波堤の開発・利用が進められている.

既に著者ら¹⁾は, 従来の越波現象を利用する港外水導入型の海水交換防波堤に代わり, 堤体底部に通水路を設けたケーソンとその沖側前面に遊水室が形成されるように垂下版を設置した遊水室型海水交換防波堤を提案し, その有効性を検討してきた. その際, 堤体底部の通水路を延長するように遊水室下部に没水平版を設けた構造体 (図-1) では, 平均流が港外側へ向かうように発生し, 港内水を排出する海水交換機能を有することや, その没水平版を取り去ると (図-2) 平均流が港内側へ向かう港外水導入型へと変化することなどを明らかにした²⁾. 以下, 前者を港内水排出方式, 後者を港外水導入方式と称することとする. 本研究では, 主に港外水導入方式の遊水室型防波堤 (図-2) の効果的な断面を前面垂下版の吃

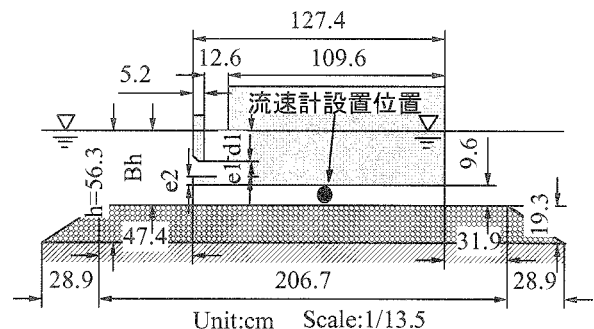


図-1 港内水排出方式の海水交換防波堤

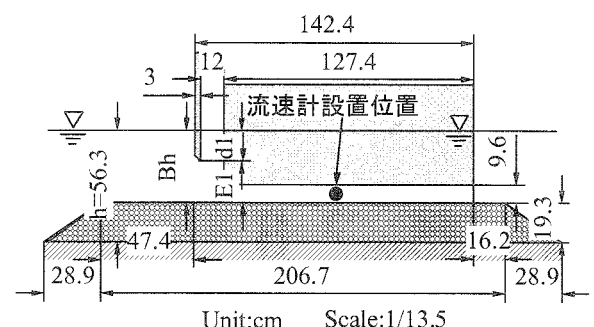
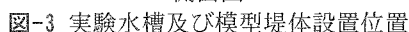


図-2 港外水導入方式の海水交換防波堤



2. 實驗概要

本実験では、図-3 に示す愛媛大学工学部の長さ 30m、幅 1m、高さ 1.25m の二次元造波水槽を用いた。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碎石およびヘチマロンよりの消波工が設置してある。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。模型堤体は、この水平床上に設置した。この際、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-3 の平面図に示すように、水槽幅をほぼ等分するように隔壁を設置して模型堤体を設置する主水路と入射波測定用の副水路に分割し、水槽の終端部に設けた消波工の内部で両水路間で通水性を維持した。また、水槽の前後端は、水槽の外側を回流できるように設けた管路で結合してあり、平面的な循環流れを阻害しないように工夫した。

図-1は、従来において提案されている港内水排出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、遊水室下部の通水部に接続するように没水平版が設けてある。

図-2は新規の堤体で、従来方式の堤体より没水平版を除去した構造にほぼ相当し、本研究で主に検討対象にした基本構造の防波堤である。ただしその寸法は、従来方式に比較して全長などの寸法に若干の相違があり、しかも前面垂下版の先端構造が異なるため、概略的な対応しか取れていない。

吃水深 d_1 を3種類に変化させ、遊水室開口長 E_1 の影響を検討した。また、従来方式においても基本構造にほぼ対応する条件下で、遊水室開口長 E_1 の影響を検討する実験を行っており、その内から代表的な結果を用いて、水平版の有無の影響を検討した。

作用波は規則波とし、その周期 T は $0.8 \sim 1.8$ sの範囲内で複数の条件を採用した。この際、入射波高は 6 cmと 12 cmの2種類を用いた。これらを現地での値に換算すると波周期 T は $2.9 \sim 6.6$ s、作用波高 H は 0.8 m、 1.6 mとなる。また採用した周期条件を波長・堤体幅比 L/B で示すと $0.6 \sim 3.7$ の範囲にあることを付記しておく。

実験では、5台の容量式波高計を図-3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台の計5台である。

ここで、反射率は、合田ら³⁾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、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1台を用いて計測した。その設置状況は、図-1、2に示す通りである。そして、通水部を介しての輸送流量は、電磁流速計による時間平均流速に通水路高さを乗じて近似的に求めた。なお、平均流速は、10波程度を目安にしてその時間平均値で代表させた。

ここでは、遊水室の開口長 $E1$ の波浪制御効果および海水交換量への影響を通常波浪時の波高条件(現地波高 0.8m 程度)を対象にして検討してみる。このとき、設置水深 h 、遊水室内水深 Bh および通水部高さ td は全て固定して、前面垂下版の下部開口長 $E1$ のみを変化させ、 $E1$ と Bh の比に着目して、開口長の影響を検討する。対象とした $E1/Bh$ の比は、概略 0.5 、 0.6 、 0.7 の3種類である。

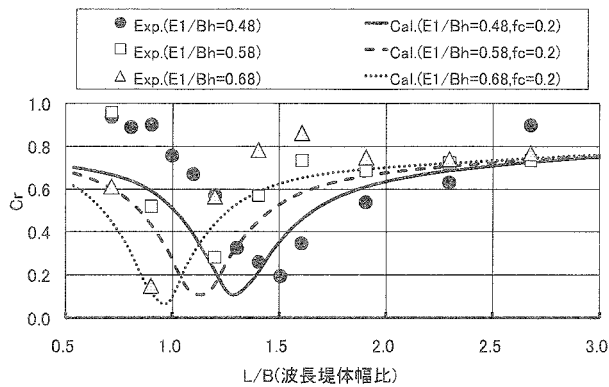


図-4 開口長E1の反射率への影響 (港外水導入方式)
(H=6cm, h=56.3cm, Bh=37cm, td=9.6cm)

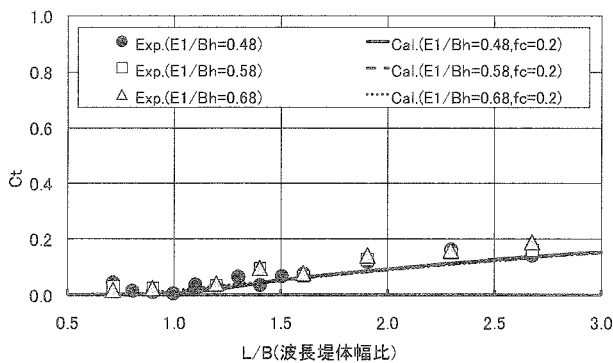


図-5 開口長E1の透過率への影響 (港外水導入方式)
(H=6cm, h=56.3cm, Bh=37cm, td=9.6cm)

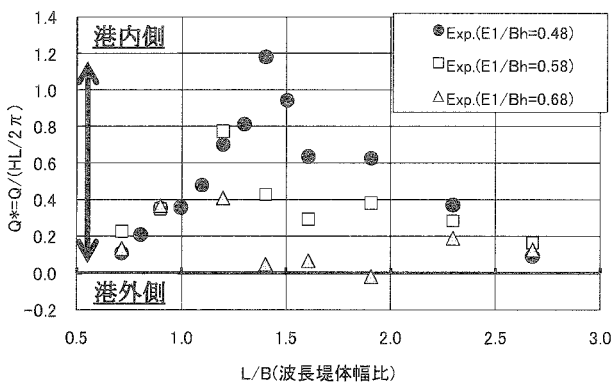


図-6 開口長E1の海水交換量への影響 (港外水導入方式)
(H=6cm, h=56.3cm, Bh=37cm, td=9.6cm)

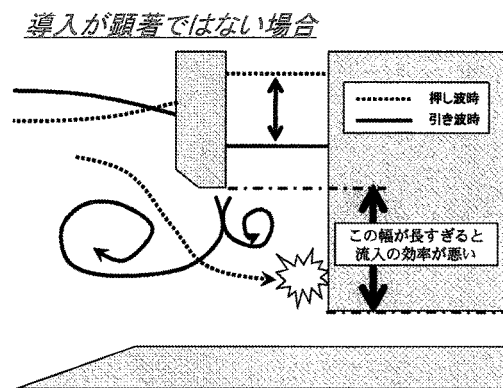


図-7 海水交換量が低減される場合の模式図

図-4, 5は, それぞれ反射率 C_r と透過率 C_t の結果を波周期による変化で示す. 図中では, 周期を表すパラメータとして L/B (波長・堤体幅比) が用いてある. 図中には, 中村・井出²⁾による減衰波理論に基づく算定結果についても併せ示す. 理論算定では, 等価線形抵抗係数 f_c が必要になるが, 従来の中村ら¹⁾の成果を参照して $f_c=0.2$ を用いた.

図-4に示す反射率 C_r に着目すると, 実験結果と算定結果の両者共に, 開口比が大きくなるほど C_r の極小値が短周期側へ移行することが分かる. これは, 開口比が大きくなると前面壁の吃水深が浅くなり, 前面壁で遮蔽される遊水室の水塊量が減少することから, 結果的にピストンモードの水柱振動質量が減少するためと考えられる. 実験結果と理論算定結果を比較すると, 開口比に伴う極小反射率の出現条件の変化など, 定性的な傾向は一致している. ただし, 開口比が最も小さいときに両結果の一致度が不十分であるなどの相違も見られる. この差異の原因については明確でないが, 前面壁の吃水深が深くなると, 遊水室下部の捨石マウンドの透過性の影響などが現れやすくなるのではと考えている.

次に図-5は, 透過率 C_t の結果を反射率と同様に示す. この図から, 透過率に及ぼす遊水室開口長の影響はほとんど見られず, 対象とした周期帯で C_t が0.2以下であるなど, 堤体底部に通水路を設けても波の遮蔽効果は十分にあるものと判定される.

図-6は, 堤体底部に設けた通水路を介しての海水交換量 Q の結果を波長・堤体幅比 L/B による変化で示す. このとき海水交換量 Q は, 波一周期当りの平均輸送流量 (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^* で示す.

この図より, いずれの開口率でも岸向きへの平均流の発生による平均輸送流量が現れることや, その輸送流量は開口比が大きくなるほど減少する傾向にあることが確認できる. この原因は図-7に模式的に示すように, 開口長が通水路高さよりも更に大きくなると, 前面垂下版の先端からの剥離流れ及び渦の形成位置が, 堤体下部に設けた通水路の位置よりも高くなり, 渦流れが通水路へ入り込みにくくなるためである⁴⁾.

従来の中村ら⁴⁾による同一方式の海水交換防波堤の成果も考慮すると, 短周期側の条件下においては, 前面垂下版下部の開口長 $E1$ が通水路高さ td の2.2倍程度までであれば有意な海水交換量を得ることができると推測される. 長周期側の条件下では, $E1$ が td と同等程度であれば有意な海水交換量を得ることができると推測される.

(2) 港外水導入方式と港内水排出方式の比較

本研究では, 表-1のcase00に示すように港内水排出方式の堤体についても港外水導入方式のそれと同様に実験を行っている. 図-8は, このときの海水交換量 Q^* と前出の港外水導入方式のそれとを比較したものである. なお, 港内水排出方式の実験で用いた

条件は、前面垂下版の吃水深や遊水室幅などをほぼ等しくなるようにしており、作用波の条件についても同一にしている。

図-8より、没水平版を取り付けた港内水排出方式の堤体では、それを除去した港外水導入方式の堤体に比較すると、平均流の発生方向が逆転することや、長周期の条件になるほど海水交換量が増加するなどの相違のあることが確認できる。そして、港外水導入方式の堤体では、比較的短周期の通常波浪の条件下で有意な海水交換量が期待できることや、没水平版がないことから、より簡単な構造になり、現地に適した海水交換防波堤の構造といえる。

4. 高波高時における結果

上記までは、通常波浪を想定して、作用波高が低い条件を対象にして検討してきた。これは、海水交換機能が発揮されるべき海域条件としては、一般的に比較的静穏な通常波浪の条件が用いられるためである。ここでは、作用波高を前出の検討に用いたそれに比較して2倍程度に大きくしたときの結果について紹介する。

(1) 波浪制御効果

図-9, 10は、高波高時において、遊水室開口比を各種に変化させたときの反射率 C_r と透過率 C_t の結果をそれぞれ示す。図中では、やはり周期を表すパラメータとして L/B (波長・堤体幅比) を用いた。

図-9に示す反射率 C_r に着目すると、図-4に示す低波高時のそれに比較して、極小反射率の絶対値が増加する傾向が見られる。この原因としては、定かではないが、短周期側の海水交換機能の向上を目的として、遊水室幅を比較的狭く設定したため、高波高時に波高と遊水室幅がほぼ等しくなるなどの影響が現れたことによるものと推測される。

図-10は透過率 C_t の結果を反射率と同様にして示す。この図から、高波高時においても透過率は0.2以下と十分な遮蔽効果が認められ、低波高時と同様に前面壁下部の開口長による C_t の差異は見られない。

以上の検討から、高波高時には反射率は増加する傾向にあるが、港内の静穏度を検討するときに重要となる透過率については作用波高の影響をほとんど受けないことが判明した。また、透過率は、やはり遊水室前面壁の下部開口長の差異の影響を受けないことも確認された。

(2) 海水交換量

a) 開口比の変化

図-11は高波高時に、遊水室開口比を変化させた場合の海水交換量 Q^* の結果を示す。図中では、周期を表すパラメータとして L/B (波長・堤体幅比) を用いてある。この図より、開口比 $E1/Bh$ がほぼ0.5の設定以外では、図-6に示す低波高時の結果に比較して

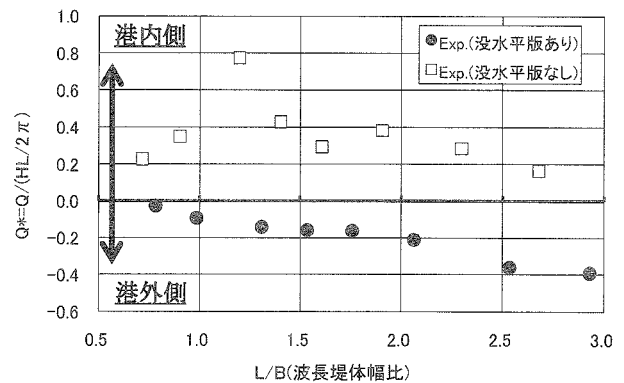


図-8 港外水導入方式と港内水排出方式の海水交換量の比較 ($H=6\text{cm}$, $h=56.3\text{cm}$, $td=9.6\text{cm}$, $d1=15.6\text{cm}$)

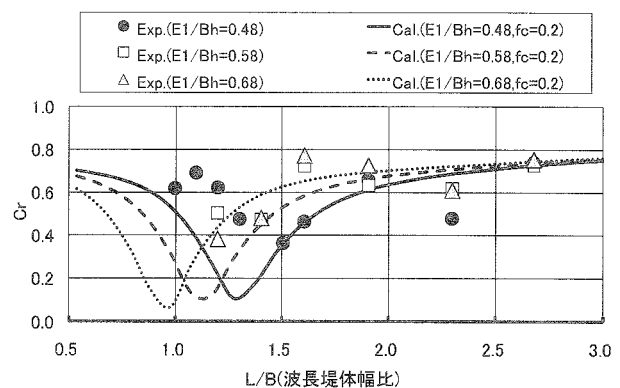


図-9 開口長 $E1$ の反射率への影響 (港外水導入方式) ($H=12\text{cm}$, $h=56.3\text{cm}$, $Bh=37\text{cm}$, $td=9.6\text{cm}$)

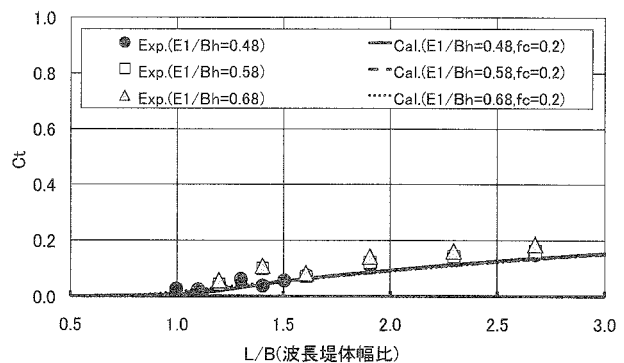


図-10 開口長 $E1$ の透過率への影響 (港外水導入方式) ($H=12\text{cm}$, $h=56.3\text{cm}$, $Bh=37\text{cm}$, $td=9.6\text{cm}$)

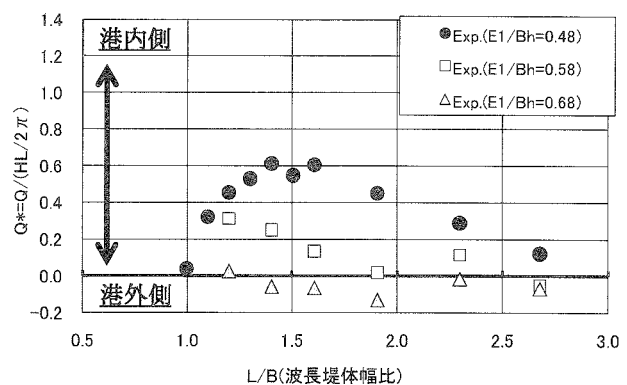


図-11 開口長 $E1$ の海水交換量への影響 (港外水導入方式) ($H=12\text{cm}$, $h=56.3\text{cm}$, $Bh=37\text{cm}$, $td=9.6\text{cm}$)

岸向きへの海水交換量は有意に低下することや、特に開口比が0.7のときには方向が逆転して沖向きへの平均輸送流量になることなどが認められる。これは高波高時になると、前面壁の吃水深が浅い条件下では引き波時に遊水室の外側に発生する渦の強度が増加する傾向にあり、押し波時に遊水室内に発生する渦と同程度の規模となるため、渦流れの対称性が現れるようになるためと考えられる。

b) 港外水導入方式と港内水排出方式の比較

図-12 は、高波高時の条件下での港外水導入方式と港内水排出方式による海水交換量の比較を無次元海水交換量 Q^* で示す。この図より、港内水排出方式では、高波高時においても無次元海水交換量 Q^* は、図-8 に示す低波高時のときとそれほど変化がないことが分かる。そして、上記したように、港外水導入方式では、高波高時になると特に長周期側で海水交換量が減少するため、結果的に高波高時においても安定して海水交換機能が発揮できるのは港内水排出方式であると言える。ただし、図-11 に示すように、前面壁下部の開口長を通水路高さの2倍弱 ($E1/Bh=0.48$) に設定した場合には、高波高時においても有意な量の海水交換機能が期待でき、要は通水路高さと前面壁下部の開口長の設定に依存すると考えられる。

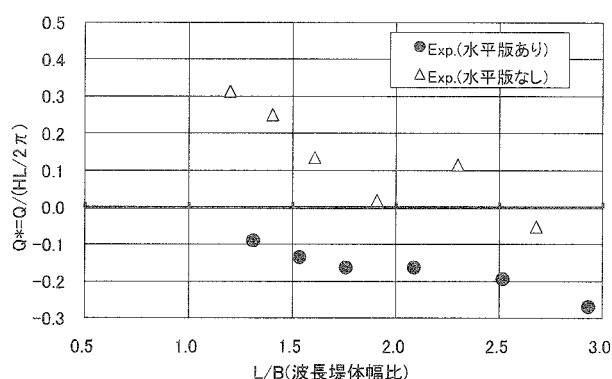


図-12 港外水導入方式と港内水排出方式の海水交換量についての比較
($H=12\text{cm}$, $h=56.3\text{cm}$, $td=9.6\text{cm}$, $d1=15.6\text{cm}$)

5. まとめ

以上、本研究では港外水導入方式の遊水室型海水交換防波堤を対象にして、前面壁下部の開口比に着目した効果的な断面の検討や、高波高時における水理学的な機能の変化などについて検討してきた。

この際、従来の港内水排出方式の海水交換防波堤との比較も行い、港外水導入方式の海水交換防波堤の特徴を明らかにしてきた。これらの検討結果をまとめると、以下ようになる。

(1) 港外水導入方式の防波堤において、前面垂下版の吃水深を浅くして、その下端部の開口長を大きくすると、堤体の下部に設けた通水路を介しての海水交換量は減少する傾向にある。これは、前面垂下版の下端からの剥離流れおよび渦への形成位置と堤体下部に設けた通水路高さとの関係による。

(2) 港外水導入方式の堤体による海水交換量は、特定の周期条件でピークを示す傾向にある。これは長周期の条件になると、特に引き波時において前面垂下版の下端よりの渦流れが十分に発達して沖側へ流れ込みが減少するためである。また、高波高時においても海水交換量が減少する傾向が見られ、これはやはり引き波時の渦流れが十分に発達することによる。

(3) 港外水導入方式の堤体による透過率は、前面垂下版の吃水深による影響をほとんど受けず、海水交換のために設けた堤体下部の通水路の特性に依存する。

(4) 港外水導入方式と港内水排出方式の堤体では、前面垂下版の下端よりの渦流れの挙動の差異により、平均流の発生方向が逆転することや、港外水導入方式では短周期側で卓越した海水交換量を示すことが特徴として挙げられる。

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路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, 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.
- 4) 中村孝幸・村上寛洋: 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, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 753-758, 2009.

