

# 基礎マウンド上に設けた海水導入式の遊水室型 海水交換防波堤の効果について

## Performance of the Intake Type Water Exchange Breakwater with a Water Chamber on Rubble Foundations

中村孝幸<sup>1</sup>・村上寛洋<sup>2</sup>

Takayuki NAKAMURA and Tomohiro MURAKAMI

In this study, a new type of water exchange breakwater was proposed. It is a water intake type with a wave resonant chamber 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. The breakwater is a gravity type and has a rubble foundation. Effective dimensions of a new breakwater have been examined from both the experimental and theoretical points. 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.

### 1. はじめに

閉鎖性の強い港では、港内の水質汚濁が問題になることが多い。このため、その対策方法の1つとして海水交換型防波堤が利用されるようになってきている。本研究は、海水交換防波堤として、本来の防波機能を維持しつつ、波と構造体の干渉により生じられる渦流れを利用し、海水交換が促進できる防波堤の開発を目指すものである。

既に著者らの中の1人（中村ら，2006）は、海水交換防波堤として図-1に示す垂下版と没水平版で構成される遊水室型防波堤を提案し、その有効性などについて報告した。この防波堤は、遊水室の底版に相当する没水平版やその下に通水部を有することに特徴があり、これまでの海水交換防波堤とは異なり、港内水を港外へ排出する機能を持つ。本研究は、このような港内水排出式の海水交換防波堤から、図-2に示すように没水平版を取り去るだけの簡単な変更により、港外水を港内に導入する方式の海水交換防波堤が新規に開発できたことから、その有効性や効果的な断面諸元について紹介する。ここでは、特に実際場を想定して、主に基礎マウンドがある混成堤形式の防波堤を対象にした。

### 2. 実験概要

#### (1) 実験水槽

本実験では、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2次元水槽を用いた。この水

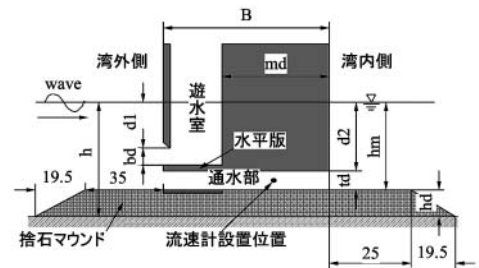


図-1 港内水排出方式の遊水室型海水交換防波堤 Unit:cm

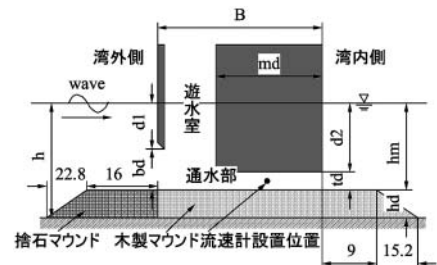


図-2 海水導入式の遊水室型海水交換防波堤 Unit:cm

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が設置してある。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てある。具体的には、図中に示すように水槽の幅方向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。

1 正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科  
2 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

## (2) 実験における模型堤体の構造諸元

図-1は従来型の港内水排出式の海水交換防波堤を示す。これは、中村ら(2006)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、遊水室の下部に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、従来型の堤体より没水平版を除去した構造にはほぼ相当し、本研究での基本構造に相当する。ただし、その寸法は、従来の排水型堤体に比較して全長などに若干の相違があり、しかも遊水室の下部構造が異なるなどのため、概略的な対応しか取れていない。

実験では、表-1に示す計9種類の諸元の堤体を用いた。これらは、大別すると、①図-1に示す従来方式の堤体、②図-2に示す新形式の堤体で基礎マウンドを有する構造、③同形式の堤体で基礎マウンドのない構造、④前出の②の堤体から、前面垂下版を取り除いた構造に分類される。そして、図-2の基本構造の堤体では、2種類の異なる設置水深 $h$ に対して、垂下版の吃水深 $d1$ を3種類に変化させ、 $h$ および $d1$ の影響が重点的に検討できるようにしてある。このとき、通水部高さ $td$ は、従来方式のみ9cmとして残りは全て5cmに固定した。また、遊水室幅 $Bw$ は、全ての実験において25cmと固定した。想定した模型縮尺は全て1/20である。

## (3) 実験条件

作用波は規則波のみとして、その周期 $T$ は、0.8～2.2sの範囲内で13種類、入射波高は10cm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台の計6台を使用した。

ここで、反射率は、合田ら(1976)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。

## 3. 没水平版の有無の影響

まず、没水平版の有無の平均流への影響を検討する。図-3は港内水排水式の堤体と海水導入式の堤体において海水交換量 $Q^*$ 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

表-1 実験で用いた模型堤体の諸元

|        | 水深<br>$h$ (cm) | マウンド<br>高さ<br>$hd$ (cm) | マウンド上<br>の水深<br>$hm$ (cm) | 垂下版<br>吃水深<br>$d1$ (cm) | 背後重量<br>物吃水深<br>$d2$ (cm) | 垂下版下<br>部開口長<br>$bd$ (cm) | 堤体長<br>$B$ (cm) |
|--------|----------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| CASE01 | 42             | -                       | -                         | 29                      | 37                        | 13                        | 81              |
| CASE02 | 42             | 15.2                    | 26.8                      | 9.8                     | 21.8                      | 17                        | 81              |
| CASE03 | 42             | 15.2                    | 26.8                      | 13.8                    | 21.8                      | 13                        | 81              |
| CASE04 | 42             | 15.2                    | 26.8                      | 17.8                    | 21.8                      | 9                         | 81              |
| CASE05 | 57.2           | 15.2                    | 42                        | 25                      | 37                        | 17                        | 81              |
| CASE06 | 57.2           | 15.2                    | 42                        | 29                      | 37                        | 13                        | 81              |
| CASE07 | 57.2           | 15.2                    | 42                        | 33                      | 37                        | 9                         | 81              |
| CASE08 | 57.2           | 15.2                    | 42                        | -                       | 37                        | -                         | 53              |
| 従来方式   | 55             | 13                      | 42                        | 21                      | 33                        | 8                         | 79              |

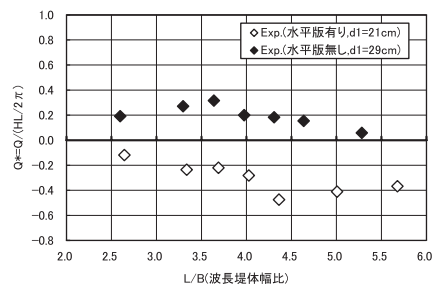


図-3 港内水排水式と外海水導入式の海水交換量の比較 (表-1内の従来方式とCASE06の比較)

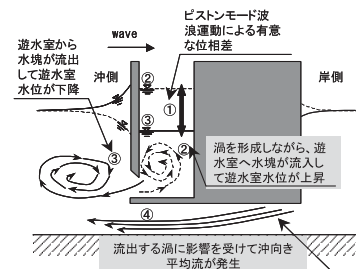


図-4 海水導入式の平均流の発生機構

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。排水式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のに対して、海水導入式では短周期側において岸向き方向に有効な海水交換がなされていることが分かる。これより、没水平版の有無により平均流の発生方向が逆転することが確認できる。没水平版があるとき、平均流が港外側へ向かうのは、遊水室からのジェット流が水平版下部の水塊をせん断作用により沖側へ輸送するためである(中村ら, 2006)。一方、没水平版を除去すると、図-4に概略的に示すように、押し波時に前面垂下版の下端からの剥離流れおよび渦流が後部矩形堤の下部に設けた通水路に直接的に作用する影響が強く現れるようになるため、一周間にわたる平均流としては港内側へ向かうようになることなどが指摘されている(中村ら, 2009)。

#### 4. 基礎マウンド設置による影響

既に著者ら (2009) は、基礎マウンドがないときの海水導入式海水交換防波堤について検討を行い、その有効性などを報告した。ここでは、特に基礎マウンドを設けたときを想定して、基礎マウンドの波浪制御効果と海水交換量への影響を検討する。

本研究では、①基礎マウンドを設置していない場合 (CASE01)、②基礎マウンドを設けた場合で、マウンド上に上記①の堤体および吃水条件を保持して、鉛直方向に平行移動した場合、③やはり基礎マウンドを設けた場合で、マウンド上に上記①の堤体を移動した場合に相当するが、マウンドの法先水深を①のときの設置水深と一致させた場合の3種類について比較した。これら3種類の堤体では、通水部高さ $h$ と垂下版の下の開口長比 $td/bd$ を0.385に固定してある。

図-5、6は、これら堤体の反射率 $Cr$ 及び透過率 $Ct$ をそれぞれ示すもので、周期を表すパラメータとして $Lo/Bw$  (沖波長・遊水室幅比) による変化で表す。図中には、中村・井出 (1997) 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、従来の成果 (中村ら, 2006) を参照して $f_c=0.2$ を用いた。

図-5に示す $Cr$ に着目すると、マウンド上の水深 $h_m$ とマウンドのないときの設置水深 $h$ を同一にすると、両者で比較的良好な対応が見られることが分かる。この傾向は、算定結果でも認められ、垂下版の吃水深 $d1$ が遊水室内の波浪共振の生起に強く関与していることによるものと考えられる。一方、上記③のマウンドを設け、設置水深を一致させた場合では、反射率の極小値は短周期側に移行して、全体的に反射率が低くなることが分かる。

次に、透過率は、図-6に見られるように、マウンドの有無や設置水深の差異にそれほど有意に影響を受けず、比較的低い状況にある。これは、透過波の大小が、背後の矩形堤の波向き方向への長さや通水部高さにより大きく左右されることによるものと考えられる。

図-7は、海水交換量 $Q$ に及ぼすマウンドの有無などの影響を検討した結果を示す。いずれのケースでも岸向き方向へ平均流が発生することや交換量が最大になるのは、マウンドのない場合であり、次に大きいのは上記②のマウンド上の水深を一致させた場合となっている。

マウンドを設けることで、海水交換量が減少するのは、流況の観測結果によると、押し波時に通水部に流入する流速がマウンド前面の斜面の存在やマウンド上の碎石の影響により低下することが確認されている。ただし、交換量は、進行波による半周期間の移動水塊量 $HL/2\pi$ で無次元化して0.2~0.3程度と依然として有意な量である。

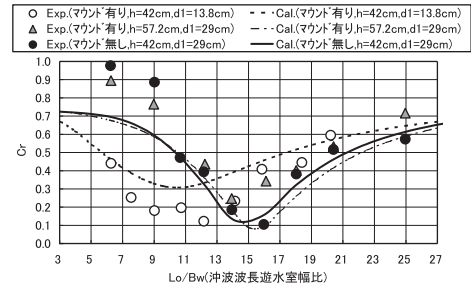


図-5 マウンドの有無による反射率への影響 ( $H=10\text{cm}$ ,  $td/bd=0.385$ ,  $bd=13\text{cm}$ )

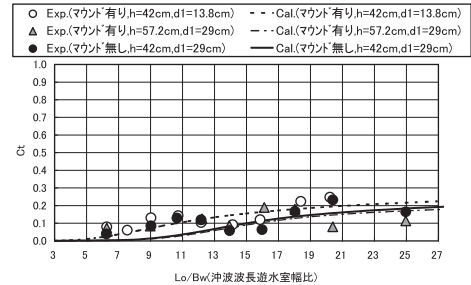


図-6 マウンドの有無による透過率への影響 ( $H=10\text{cm}$ ,  $td/bd=0.385$ ,  $bd=13\text{cm}$ )

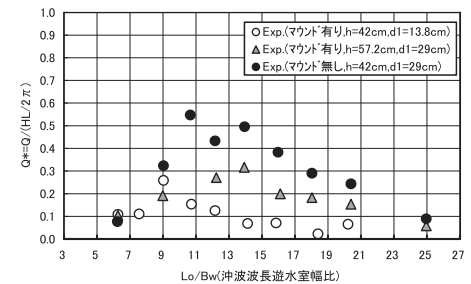


図-7 マウンドの有無による海水交換量への影響 ( $H=10\text{cm}$ ,  $td/bd=0.385$ ,  $bd=13\text{cm}$ )

マウンド上の水深 $h_m=13.8\text{cm}$ と最も浅いとき、交換量が低下するのは、引き波時に水面が垂下版の下端に近くなるため、押し波時と同様に強い渦が形成され、一周期間での発生渦の対称性が現れるようになるためと考えられる。これについては、次の節でさらに検討する。

#### 5. 垂下版の吃水深 $d1$ の影響

ここでは、マウンドがあり設置水深が深い場合 ( $h=57.2\text{cm}$ ) を対象にして、前面垂下版の吃水深を各種に変化させてその影響を検討してみる。このとき、マウンド上の水深 $h_m$ は $42\text{cm}$ に固定してある。

図-8~10は、このときの結果に対応するもので、それぞれ反射率、透過率、海水交換量について示す。図中では、周期に関する無次元量として、前節での結果を踏まえて、マウンド上の水深 $h_m$ に対応する波長 $L_m$ と遊水室幅 $B_w$ の比を用いた。

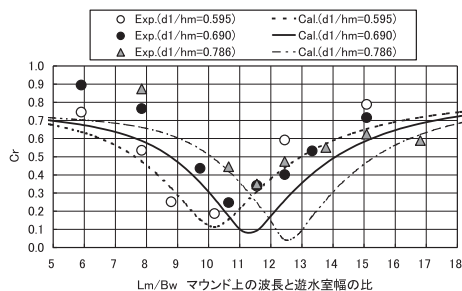


図-8 垂下版の吃水深の反射率への影響  
( $h=57.2\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

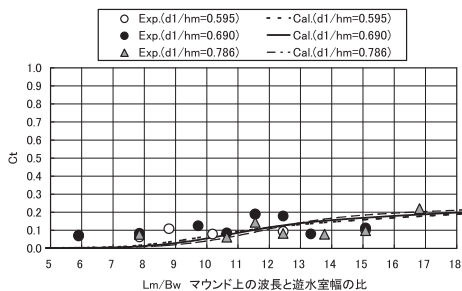


図-9 垂下版の吃水深の透過率への影響  
( $h=57.2\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

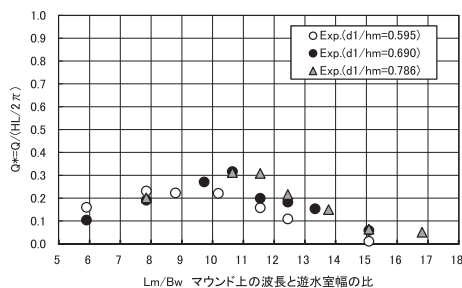


図-10 垂下版の吃水深の海水交換量への影響  
( $h=57.2\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

まず、反射率  $Cr$  に着目すると、吃水深  $d1$  が深くなるに連れ  $Cr$  が極小となる  $L_m/B_w$  の値が順次増加して長周期側に移行することが分かる。これは、既に排水式の海水交換防波堤の研究 (中村ら, 2004) で指摘されているように、吃水深に伴い振動水量が増加して、遊水室内のピストンモード波浪共振点が長周期側に移行するためである。算定結果でも同様の傾向が見られるが、実験結果との定量的な対応は十分でなく、特に吃水深が深くなると線形抵抗係数  $f_c$  の設定の不十分さによるものか、差異が拡大する傾向にある。

一方、透過率は、図-9に示すように垂下版の吃水深による差異がほとんど認められず、やはりその絶対値は後方の矩形堤の長さとその下部に設けた通水路の高さに強く依存しているものと考えられる。

図-10は、海水交換量の比較を示すが、前面垂下版の吃水深が浅くなると多少ながら減少する傾向が認められ

る。これは、吃水深が浅くなると、版下端部からの剥離流れや渦流が後方の矩形堤の下部に設けた通水路に直接的に影響する割合が減少することによるものと推測される。また、この図から、無次元海水交換量が極大になる周期条件は、反射率が極小を示す条件にほぼ対応することなどが指摘され、海水交換量はピストンモード波浪共振と密接な関係を有することが推測される。

## 6. 設置水深 (潮位) の影響

図-11は、前出の図-8, 9に比較して、水位を  $15\text{cm}$  (現地量で  $3\text{m}$ ) 低くした、いわゆる低潮位の際の反射率  $Cr$  及び透過率  $Ct$  について示す。周期を表すパラメータは、マウンド上の水深に対応する波長  $L_m$  と遊水室幅  $B_w$  の比  $L_m/B_w$  を用いた。ここでは、前面版の吃水深  $d1$  は、図-8, 9での  $d1/h_m=0.595, 0.690$  の2種類のものについてのみ示す。前出の図-8, 9の  $Cr, Ct$  に比較すると、水位の低下に伴い、前面版の吃水深が浅くなるため、反射率の極小値はさらに  $L_m/B_w$  の小さな短周期側に移行することが認められる。一方、透過率  $Ct$  は、水位の低下に伴い、多少ながら増加する傾向にあるが、それほど有意な増加量ではない。図-12は、このときの海水交換量を示すもので、図-10の結果の低潮位版に相当する。ここでも、前面版の吃水深  $d1$  は、図-10での  $d1/h_m=0.595, 0.690$  の2種類のものについてのみ示す。この図に見られるように、水位が低下して前面垂下版の吃水深が浅くなると、海水交換量はかなり低下することや、最も浅い吃水深の条件では、

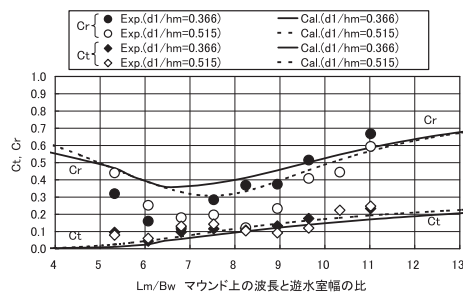


図-11 低潮位の際の反射率・透過率  
( $h=42\text{cm}$ ,  $h_m=26.8\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

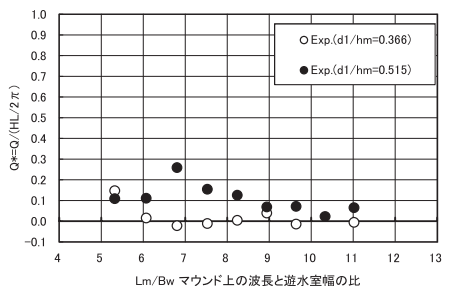


図-12 低潮位の際の海水交換量  
( $h=42\text{cm}$ ,  $h_m=26.8\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )



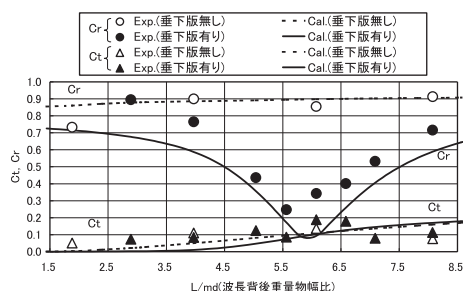


図-13 垂下版の有無による波浪制御効果への影響  
( $h=57.2\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ , 導入式の $d1=33\text{cm}$ )

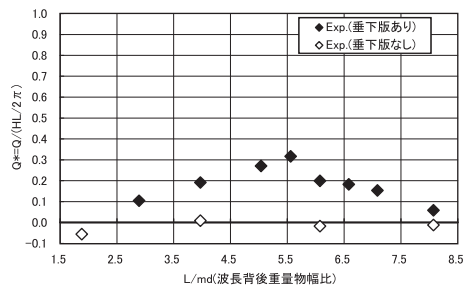


図-14 垂下版の有無による海水交換量への影響  
( $h=57.2\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ , 導入式の $d1=33\text{cm}$ )

岸側にも沖側にも水塊は輸送されない状況に到ることが分かる。これは、上述したように前面垂下版の吃水深が浅くなると、引き波時に発生する渦の強度が増して、押し波時のそれと同程度のものとなり、一周期間の平均輸送流量が減少することによる。

## 7. 垂下版の有無の影響（下部透過型矩形堤）

最後に、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ついて検討を行った。このとき、マウンド有りで、設置水深 $h$ は $57.2\text{cm}$ の条件とした。

図-13は、このときの反射率 $Cr$ 及び透過率 $Ct$ を、周期を表すパラメータとして $L/md$ （波長・背後重量物幅比）による変化で示す。図中には、比較のため、垂下版を設けた海水導入式の堤体（同じ設置水深で垂下版吃水深 $d1=33\text{cm}$ ）の結果についても併せ示す。

この図より、矩形堤の $Cr$ は、遊水室型堤体に比較して、極度に増加することが分かる。これは、前面垂下版がないため不透過直立堤に近い構造となり、遊水室による波エネルギーの逸散現象が現れないことによる。

一方、 $Ct$ に着目すると、両堤体構造でほとんど差異が見られず、透過波が主に背後矩形堤の長さや下部通路の 높さに左右されることによるものと考えられる。

図-14は、海水交換量に関する比較を同様にして示す。垂下版を除去すると、海水交換はほとんど行なわれず、垂下版の下端から発生する渦が平均流の生成に大きく貢献していることが理解できる。

## 8. まとめ

- (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、没水平版を取り除いた構造に変更すると、堤体下部の通水路で平均流の方向が港内側へと逆転し、いわゆる海水導入式の遊水室型海水交換防波堤が構築できる。
- (2) 新規に提案した海水導入式の堤体では、その海水交換量が前面垂下版の吃水深により変化する。例えば、前面垂下版の吃水深を浅くすると、その下端位置が堤体下部に設けた通水路から遠ざかるようになり、通水路に及ぼす垂下版下端からの剥離流れの作用が弱くなるため、海水交換量は減少するようになる。このとき、透過率は、背後重量物の影響を強く受けるためか、垂下版の吃水深による影響をほとんど受けない。
- (3) 基礎マウンド上の堤体断面諸元をマウンドのない場合と同一にした場合、マウンドの有無による反射・透過波の低減特性への影響はほとんど見られない。ただし、マウンドを設置することで、海水交換量の絶対値は減少する傾向にある。
- (4) 海水導入式堤体より前面垂下版を取り外して、下部透過型の矩形堤にすると、反射率は極度に増加することや、海水交換量は大幅に低下するなど、非常に大きな影響が現れる。

## 参考文献

- 合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976) : 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.
- 中村孝幸・井出善彦 (1997) : 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.
- 中村孝幸・佐伯信哉・中山哲蔵・大村智宏 (2004) : 垂下版式低反射工の潮位による反射波低減効果の変動特性とその対策法について, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.695-700.
- 中村孝幸・中山哲蔵・大村智宏・榎本一徳・兼貞 透 (2006) : 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.
- 中村孝幸・村上寛洋 (2009) : 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.