

ジャケット式遊水室型防波堤の水理特性と作用波力について

Performance of a Jacket-Type Breakwater with Water Chambers in Deep Sea

中村孝幸¹・高見慶一²

Takayuki NAKAMURA and Keiichi TAKAMI

In comparatively deep sea, under which soft grounds exist and also comparatively long waves like swells attack, a curtain-walled breakwater has been adopted as a possible structure for simplicity. However, horizontal wave forces on such curtain-walled breakwaters become very large because of deep draft depth. For the economical construction of breakwaters in those deep sea ports, it has been newly proposed that a jacket-type breakwater with water chambers consisting of two vertical walls and one submerged horizontal plate. The effectiveness of a newly proposed breakwater has been examined extensively, especially focusing on the reduction rate of transmitted waves and wave forces.

1. はじめに

既に著者ら (2005) は, 大水深域で高い消波性能を発揮できる防波堤形式として, ジャケット式遊水室型防波堤を提案した. この防波堤は, 遊水室前面の開口部からの流体の出入による発散波を利用するため, 構造体の吃水深を深くすることなく比較的長周期の波に対する制御効果が発揮できる利点がある. また, 反射波についても遊水室内のピストンモード波浪共振を利用して, 前面壁の下端部で強い渦流れが生成されるため, 大幅に低減できる特長がある.

本研究は, このようなジャケット式遊水室型防波堤の最大の利点と考えられる作用波力の低減効果を, 従来の杭式防波堤であるカーテン型防波堤の結果と比較しながら明らかにする. また, 重力式構造の遊水室型防波堤で報告されている (中村ら, 2003) 平均流の発生の有無やそれに伴う海水交換機能についても主に実験的に明らかにする. この際, やはりカーテン型防波堤による海水交換機能と比較し, 遊水室型防波堤の優位性を明確にする.

2. 研究の内容

(1) 模型堤体

大きく分類して, 図-1 に示すジャケット式遊水室型防波堤を模擬した堤体と, これとほぼ同一の透過波の遮断特性を有するように断面設定したカーテン型防波堤の2種類を用いた. ジャケット式遊水室型防波堤は, 従来の重力式構造の遊水室型防波堤 (中村ら, 2003) において, 堤体下部の通水部を大きく開口した場合に相当する. また, 遊水室型防波堤では前面開口長 e_f による影響を検討するため, $e_f = 7.5$ cm, 12.5 cm の2種類を用いた.

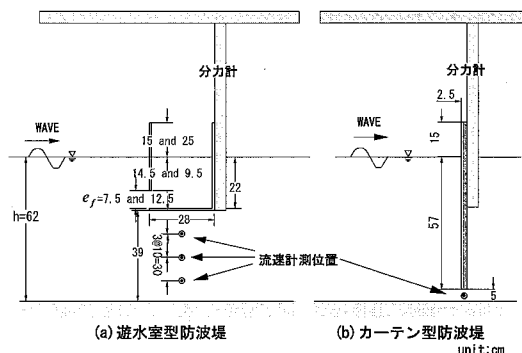


図-1 模型堤体の断面

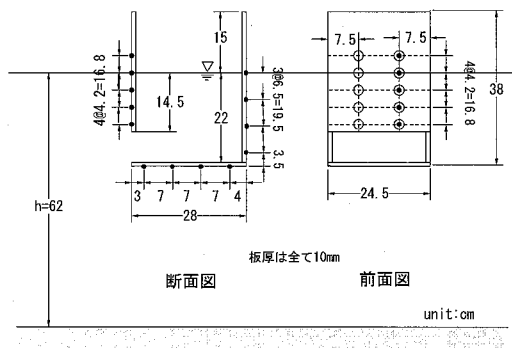


図-2 波圧計の設置位置 HWL (水深 $h=62$ cm)

このとき, 模型縮尺は約 1/46 を想定した.

(2) 実験水路および測定装置

実験には, 長さ 30 m, 幅 1 m, 高さ 1.2 m の 2 次元造波水路を用いた. 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長さ約 13 m の水平床部を設けた. 水平床部には水路幅をほぼ二分するように隔壁を設け, 一方の水路で入射波が, もう一方の水路に模型堤体を設置して反射・透過波などが測定できるようにした. この隔壁の終端には, ヘチマロ

ンと捨石斜面で構成される消波工を設け、この終端部と隔壁先端部を介して平均流が回流できる構造としており、より正確な海水交換量が測定できるようにした。このとき、模型堤体は、造波板よりほぼ19 mの位置に固定した。

波変形の測定には、計4台の容量式波高計を用いた。このうち、1台を入射波の測定、2台を入・反射波の分離測定用、残りの1台を透過波の測定に充てた。

波力の測定は、図-1に示すように半導体ひずみゲージで構成される分力計により堤体を片持ち梁形式で支持して、堤体に作用する水平波力、鉛直波力、転倒モーメントを分離して検出できるようにして行った。また、図-2に示すように計26台の波圧計を各部材の裏表で組にして設置して、堤体を構成する各部材波力やその空間分布が検討できるようにした。

堤体下部を介しての平均輸送流量（海水交換量）の測定には、ドップラー式流速計3台あるいは1台を図-1中に示すように通水部に設置して流速測定を行い、平均流速を算出して海水交換量などの検討に用いた。

(3) 実験条件

実験では設置水深として、高潮位と低潮位に対応する2種類を用いた。以下では、紙面の都合上、高潮位に相当する水深 $h=62$ cm に対する結果のみを紹介する。

実験に用いた波条件は、規則波で周期 T が $0.9 \sim 2.0$ s の範囲の10種類程度、波高 H が 6.5 cm, 10 cm, 13 cm の3種類とした。以下では、主に代表的な波高条件に相当する $H=10$ cm の結果を主体として紹介する。

3. 消波特性について

(1) 遊水室型防波堤の検討

図-3は遊水室型防波堤の透過率 C_t と反射率 C_r を L/B （波長堤体幅比）による変化で示す。図中には、実験結果（EXP）と算定結果（CAL）を併せて示す。理論的な算定には、渦流れなどの発生による波のエネルギー逸散を近似的に考慮する中村・井出（1997）の減衰波理論に基づく数値解析法を用いた。このとき、従来の研究（中村ら、2005）に準じて線形抵抗係数 $f_c=0.2$ を用いた。

この図から、遊水室型防波堤では C_t と C_r の両者は $L/B=10$ 付近において比較的低く、同程度に低減される特性が見られる。特に $L/B=10$ 付近における反射率の低減が著しい特性は、遊水室内のピストンモードの波浪共振に伴う強い渦流れの発生に起因するものである（中村ら、2003）。

図-4は、遊水室型防波堤の開口部を拡幅したときの C_t と C_r を同様にして示す。図中には、線形抵抗係数 $f_c=0.2$ と $f_c=0.35$ を用いたときの算定結果の両者を示す

が、実験結果との対応がよいのは、 $f_c=0.35$ の結果と判定される。これは、特に反射率に対して見られ、吃水深が浅くなることで、短周期側でもより強い渦流れが生成され、エネルギー逸散が増大することによるものと考えられる。

一方、図-3と図-4の比較から、遊水室の開口部を大きくすると、反射率が一旦極小となる L/B の条件が短周期側に移行することや絶対値も低下する傾向にあることが分かる。ただし、透過率に関しては開口部を大きくすることの影響はほとんど見られない。このように、今回のモデルでは、前面カーテン壁の吃水条件が比較的浅い方が反射率が低くなるなどより効果的と考えられる。

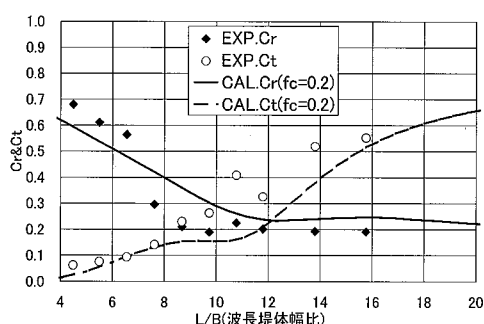


図-3 遊水室型の透過率 C_t と反射率 C_r ($H=10$ cm)

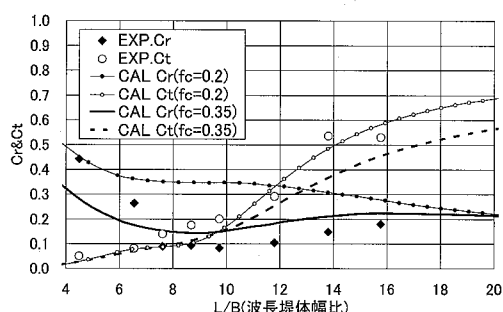


図-4 開口部大のときの透過率 C_t と反射率 C_r ($H=10$ cm)

(2) カーテン型防波堤との比較

図-5は、カーテン型防波堤の透過率 C_t の実験結果と算定結果の比較を L/h （波長水深比）による変化で示す。図中には、比較のため、前出の基本型の遊水室型堤体 ($e_f=7.5$ cm) に対する透過率の結果についても併せ示す。なお、カーテン型堤体の算定での線形抵抗係数 f_c には、従来の研究（中村・井出、1997）と同じく $f_c=0.15$ を用いた。一方、図-6は、同様の比較検討を反射率 C_r について行った結果を示す。

これらの図より、カーテン型堤体の透過率は、カーテン壁を海底付近まで延伸しているため、遊水室型堤体と同程度に低いことがわかる。なお、カーテン型堤体の吃

水深は、理論的な検討に基づき、 $L/h=4.5$ 付近において遊水室型堤体とはほぼ同じ透過率となるようにと設定しており、実験結果においてもその設定の妥当性が確認できる。

一方、反射率は、図-6に見られるように、カーテン型堤体において非常に高く、カーテン壁の吃水深を深く設定したことによる副作用と言える。図-7は、両堤体による波のエネルギー逸散率 EL の比較を示すが、遊水室型堤体ではカーテン型に比較してかなり高く、遊水室の前面開口部よりの渦流れの生成によるエネルギー逸散の増大の影響によるものである。そして、このような逸

散率の増大化傾向は、理論的にも予測できることが分かる。

4. 作用波力特性

実験では、堤体に作用する水平波力、鉛直波力、転倒モーメントを測定したが、以下では、水平波力 F_x 、鉛直波力 F_z の結果のみを紹介する。この際、波力の極大値を波高に相当する動水圧分 ($w_0 H$) で除した無次元波力強度で表し、その波力強度は正負に区別して検討した。この波圧強度は次式で定義される。

$$F_x^* = F_x / w_0 H d, \quad F_z^* = F_z / w_0 H B \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 w_0 : 流体の単位体積重量、 d : 堤体の吃水深、 B : 堤体幅 (=28 cm) である。

(1) 遊水室型防波堤

図-8、図-9はそれぞれ、遊水室型防波堤(基本形状)に作用する水平波力 F_x^* と鉛直波力 F_z^* の結果を L/B (波長堤体幅比) による変化で示す。ここで、水平波力は押し波時を正、鉛直波力は鉛直上向きを正と定義し、堤体に作用する波力の正方向と負方向の極値を PEAK+, PEAK-, 算定結果を CAL として示す。また、基本型の遊水室型堤体 ($e_f=7.5$ cm) による波変形の検討と同様に、理論算定には線形抵抗係数 $f_c=0.2$ を用いた。

実験結果と算定結果を比較すると、水平波力については、PEAK+ は $L/B=8 \sim 16$ の間で、実験結果が算定結果を上回る結果となった。これは、中周期から長周期において、遊水室内でのピストンモード波浪共振に伴う渦流れの生成により、前面版に波が遡上するときに、遊水室内では水位は低くなるため波力が増加したためと考えられる。また、理論算定では静水面下のみに作用する波圧積分しか行っておらず、遡上波の影響を無視していることも原因と考えられる。

一方、鉛直波力については、水平波力のように遡上波の影響がないことから、測定波力が算定波力を上回るような傾向は見られない。むしろ、中周期から長周期にかけて実験値が算定値を下回る結果となった。また、その波力強度は、0.2程度と比較的小さく、例えば衝撃的な栈橋揚力などに比較すると、発生因も異なるため、かなり小さい。また、 $H=10$ cm と $H=13$ cm の結果を比較すると、ほとんど差異がみられず、波高の大小による鉛直波力強度への影響は少ないと考えられる。

図-10、図-11は、それぞれ遊水室型堤体の前面版に作用する水平波力 F_f^* 、後面壁に作用する水平波力 F_r^* の実験結果を L/B (波長堤体幅比) による変化で示す。これら部材波力は、各部材に設置された波圧計による合成波圧を介して求めた。なお、 F_f^* の無次元化のための代表長には、前面版の吃水深 d' を用いた。この F_f^* は、

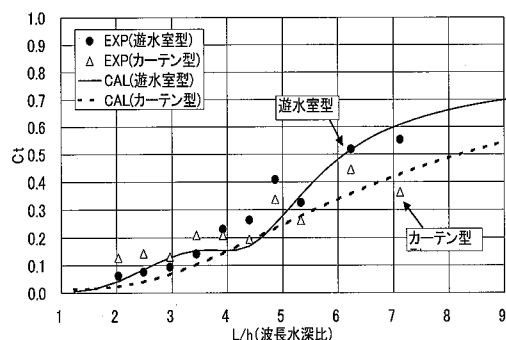


図-5 遊水室型とカーテン型の透過率 C_t の比較 ($H=10$ cm)

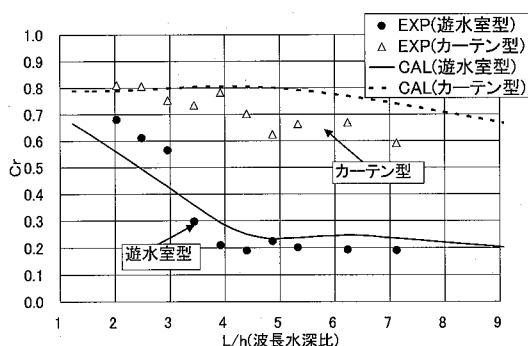


図-6 遊水室型とカーテン型の反射率 C_r の比較 ($H=10$ cm)

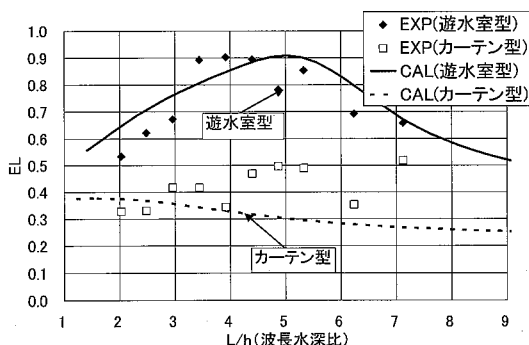


図-7 エネルギー逸散率 EL の比較 ($H=10$ cm)

実験結果が算定結果より大きくなる傾向を示す。これは、前述した様に、前面版への遡上波の影響によるものと考えられる。一方、 F_y^* の実験結果は、算定結果を下回る結果となった。これは、遊水室開口部での渦流れ等によるエネルギー逸散が予測よりも大きく現れ、遊水室内の波高増幅度が算定結果よりも低く現れたことが原因と考えられる。

図-12 は、 $T=1.2$ s、 $H=10$ cm ($L/B=7.6$) の波条件で計測された各部材に作用する水平波力と堤体に作用する全水平波力の時間波形を示す。前面版の水平波力と後面壁の水平波力の極大値は、同時に現れず、比較的大きな位相差のあることが分かる。このため、全水平波力は、各部材に作用する極大波力の単純和より小さく、その推定に当たり部材波力間の相殺効果が重要になる。

図-13 は、各部材波力の正ピークの出現位相を全水平波力の正ピークを基準位相として示す。前面版と後面壁に作用する水平波力の位相差は、短周期側で180度と逆位相関係にあり、長周期側になるとその位相差は減少する傾向にある。そして、このような位相差の減少が、図-8に見られるような長周期側での水平波力の増大に関係するものと考えられる。また、前面版に作用する水平波力と全水平波力との位相差は、比較的小さいことから、この部材波力が全水平波力により大きな影響を及ぼしていることも分かる。

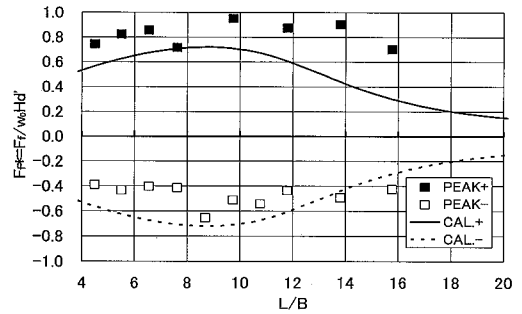


図-10 前面版に作用する水平波力 F_y^* ($H=10$ cm)

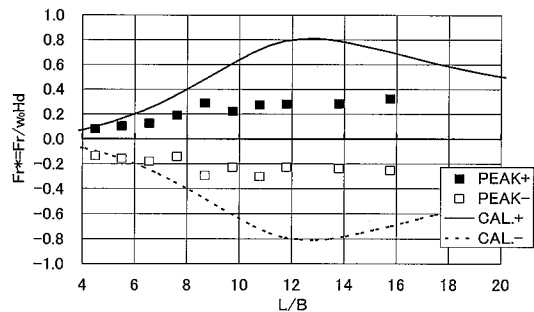


図-11 後面壁に作用する水平波力 F_y^* ($H=10$ cm)

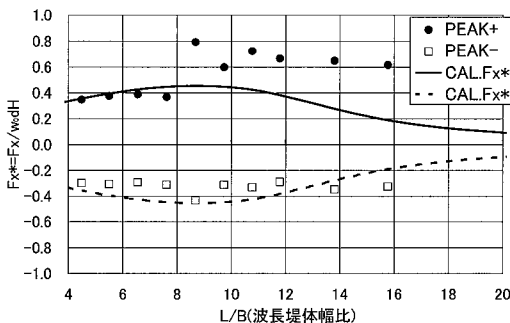


図-8 遊水室型堤体に作用する水平波力 ($H=10$ cm)

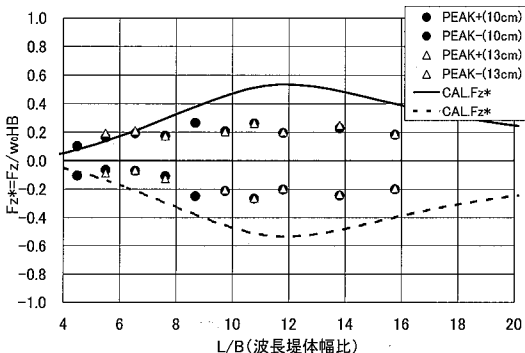


図-9 遊水室型堤体に作用する鉛直波力 ($H=10, 13$ cm)

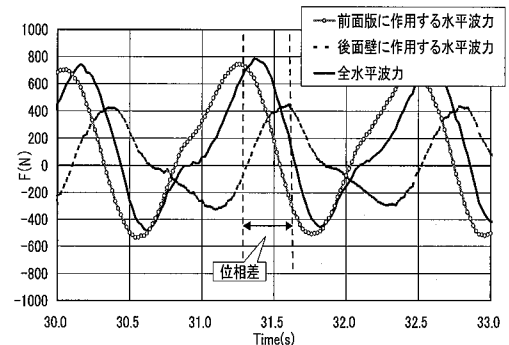


図-12 各部材の水平波力と全水平波力の時間波形 (遊水室型堤体 $T=1.2$ s, $H=10$ cm, $L/B=7.6$)

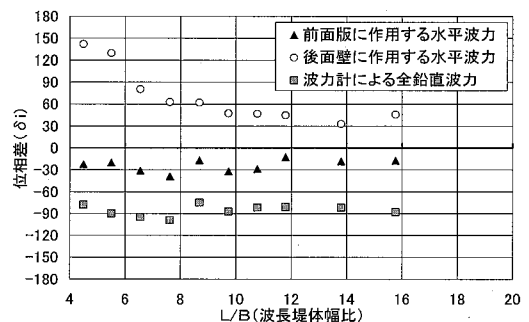


図-13 各部材波力の位相関係 ($H=10$ cm)

一方、鉛直波力のピークの出現位相は、全水平波力のそれと比較して、ほぼ90度の位相差があり、全水平波力と全鉛直波力は、同時に作用しないことも確認できる。

(2) カーテン型防波堤との比較

図-14は、遊水室型防波堤とカーテン型防波堤に作用する波力強度の比較を示す。ここでの無次元波力強度には、比較が容易となるように共通して $woHh$ で除した F_x^{**} を用いた。この図の比較から、遊水室型堤体の水平波力はカーテン型のそれに比較して1/3程度になるなど、水平波力が有意に低減されていることが分かる。

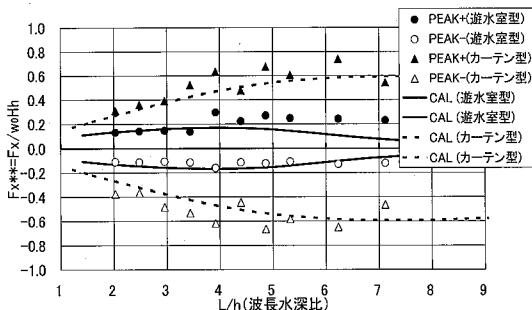


図-14 遊水室型とカーテン型の波力強度の比較 ($H=10\text{cm}$)

5. 海水交換機能

図-15は、遊水室型堤体で2種類の異なる前面開口幅のときの無次元平均輸送流量 Q^* の L/B による変化を示す。 Q^* は、堤体の単位幅当たりで波一周期間の平均輸送流量 Q を波運動による半周期間の移動水塊量 $HL/2\pi$ で無次元化した量に相当する。

この図より、基本型堤体 ($e_f=7.5\text{cm}$) では全体的に負の方向、すなわち、沖向き方向に輸送される傾向にあり、しかも従来の重力式構造の結果 (中村ら, 2003) と比較して、有意な海水交換能力を持つと判定される。また、遊水室開口部を大きくすると ($e_f=12.5\text{cm}$)、基本型に比較して、平均輸送流量は減少する傾向にあり、開口部でのジェット流が弱まることによるものと考えられる。

最後に図-16は、遊水室型防波堤とカーテン型防波堤の平均輸送流量 Q^* の比較を示す。カーテン型堤体では、水底付近に狭い開口長しかないため、平均輸送流量はかなり小さく、消波機能と海水交換機能の両者から考えて遊水室型防波堤に比較するとかなり劣ることが分かる。

6. 結 語

- (1) 比較的長周期の波に対して、遊水室型防波堤とカーテン型防波堤の透過率を同程度となるように断面設定すると、遊水室型防波堤の吃水深はカーテン型防波堤

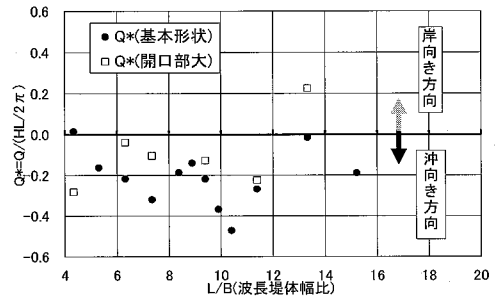


図-15 開口部変化による海水交換流量 Q^* の変化 ($H=10\text{cm}$)

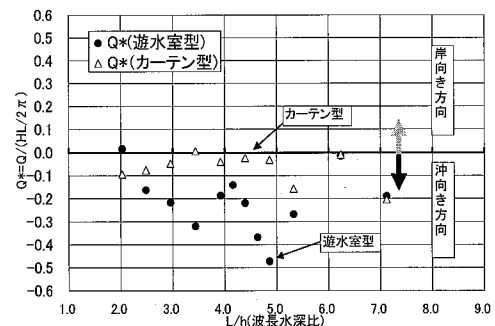


図-16 遊水室型とカーテン型との平均輸送流量 Q^* の比較 ($H=10\text{cm}$)

のそれに比較してかなり浅くすることができる。このとき、反射率は、遊水室型の方がカーテン型に比較して十分に小さく、これは遊水室型で特徴的な強い渦流の発生による逸散現象に起因する。

- (2) 遊水室型防波堤の水平波力は、カーテン型のその1/3程度になるなど、有意に波力低減される。また、遊水室型堤体に作用する鉛直波力は、その波力強度が0.2程度とかなり小さく、水平波力との位相差も90度程度あるなど、それほど重要な波力ではない。
- (3) ジャケット式構造を想定した遊水室型防波堤では、堤体下部の開口部が水底までと広くなるにもかかわらず、平均輸送流量が沖向き方向に有意な量で現れるのに対して、カーテン型ではほとんど見られない。

参 考 文 献

- 中村孝幸・井手善彦(1997): 波の逸散現象を利用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・大村智宏・大井邦昭(2003): 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, 海講論文集, 第50巻, pp. 806-810.
- 中村孝幸・米島幹雄・田中 潔(2005): 没水平板を有する遊水室型杭式防波堤による透過波の低減機構とその効果について, 海講論文集, 第52巻, pp. 671-675.