

# 重力式遊水室型海水交換防波堤のマウンド被覆材の耐波安定性について

Stability of Amour Units for the Water Exchange Breakwater Foundation of Water Chamber Type Against Waves

中村 孝幸<sup>1</sup>・中村 淳一<sup>2</sup>・兼貞 透<sup>3</sup>

Takayuki NAKAMURA, Junichi NAKAMURA and Toru KANESADA

The authors have developed a water exchange breakwater of water chamber type, in which the piston mode wave motion in the chamber is used as a major driving force for generating mean flows by waves. In this study, intending the development of a gravity type water exchange breakwater on a rubble mound, stability of amour concrete units of a rubble foundation has been examined experimentally. As a comparison test, stability of the same amour units for an impermeable caisson breakwater was also examined. It has become known that the jet flow from the gap under the front curtain wall of the water exchange breakwater has close relations to the stability of amour units on the rubble foundation. It was seen that the critical wave height for stability of the amour units for the water exchange breakwater was comparatively small.

## 1. はじめに

既に著者ら(中村ら, 2002)は, 波による渦流れを利用して港内の水を港外へと排水する方式の「渦流制御式海水交換促進型防波堤」を提案した. この防波堤は, 異吃水二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.

本研究では, 防波堤を実際場に適用するとき遭遇する各種の問題点, 特に重力式構造とするときの問題点について検討を進めた. 具体的には, 図-1に示すような重力式構造を想定すると, マウンド捨石の被覆を目的とする被覆ユニットの所要質量の推定が必要となる. 現状では, 混成堤に対するマウンド被覆材の所要質量の推定法を準用する等の方策しかないが, 現象的には特に遊水室型防波堤で特徴的な渦流れの作用による被覆材の安定性が重要になると考えられる. ここでは, 流況の可視化による後流渦の形成特性の把握や堤体まわりの流速場および波変形の実験結果と併せて, 被覆材の移動特性を明確にすることを目的としている.

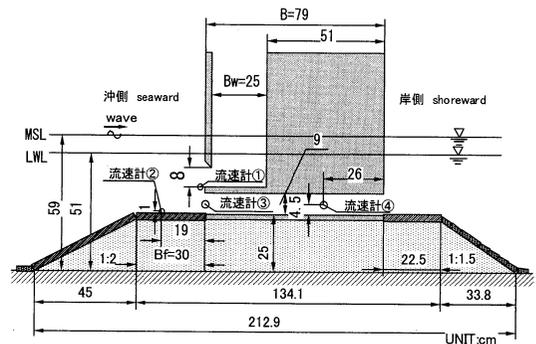


図-1 模型堤体断面図

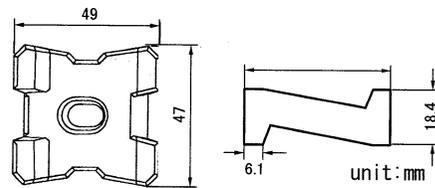


図-2 被覆ブロック (62g) の概略図

## 2. 実験装置および実験方法

### (1) 模型堤体およびマウンド被覆材

実験で用いた遊水室型の海水交換防波堤の模型を図-1に示す. これは, 従来の研究(中村ら, 2003)で用いた重力式構造の遊水室型防波堤を捨石構造のマウンド上に設置したものである. マウンドの中詰材には, 径1cm程度の碎石を用い, その上に図-2に示す平型の被覆ブロッ

クを規則的に配置した.

このとき想定した模型縮尺は1/17程度である.

本研究では, マウンド被覆材の耐波安定性の検討を主体としているため, 遊水室幅, 遊水室開口長および通水部高さなどは, 図中に示す値に固定して実験を行った. ただし, 水位については, 被覆材の安定に対して危険側となる低潮位と平均潮位の2種類を対象にした.

一方, 比較実験として, 遊水室前面の開口部および最下端の通水部を閉じて不透直立堤に変更したときの耐波安定実験も行い, マウンド被覆材の安定性に及ぼす遊水室構造および通水部の影響が判別できるようにした. 以

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

下では、簡単化のため、混成堤形式の遊水室型海水交換防波堤を海水交換堤、不透過直立堤のことを不透過堤と略称したい。

(2) 実験水槽および測定装置

実験には、長さ30m、幅1m、高さ1.2m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、この背後に斜面に接続するように長さ約13m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。堤体周辺の流速場の測定には、超音波流速計4台を用いた。これらは、図-1中に示すように、①遊水室開口部、②沖側マウンド直上、③沖側通水部、④岸側通水部に設置した。

(3) 実験条件

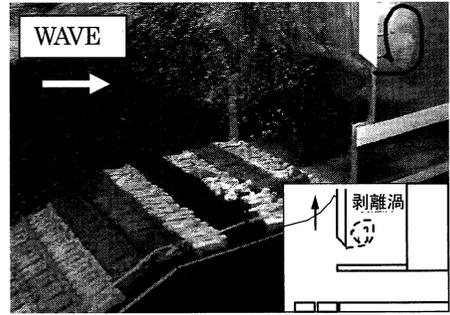
実験は①被覆材の耐波安定性および波変形の実験、②流速場の測定実験の二つに分離して実施した。設置水深は、低潮位および平均潮位の両者を想定したが、実験では主に、マウンド被覆材が遊水室開口部から発生する、ジェット流および渦の影響を最も受けると考えられる低潮位を中心に行った。実験に用いた作用波は、規則波と不規則波の両者を用いた。このとき、波周期 $T$ は規則波で1.2, 1.4, 1.8, 2.3sの4種類、不規則波では有義波周期で1.4, 1.8, 2.3sの3種類とした。波高 $H$ は両者とも6~22cmの間で、被覆ブロックの被災が確認されるまで順次2cm程度ずつ増大させて行った。

3. 遊水室型海水交換防波堤周辺の水理特性

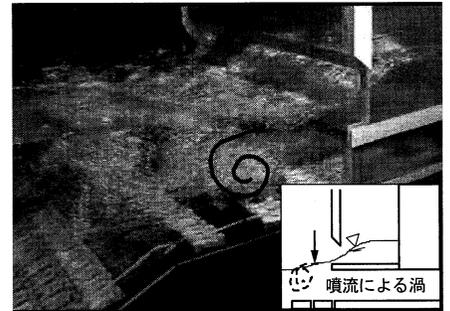
(1) 渦の生成とマウンドへの作用

遊水室型防波堤は、遊水室開口部からジェット流が流出することで渦流れが形成される。この渦流れは、遊水室内でのピストンモード波浪共振の発生に伴い、より強化される傾向にある。このような強い渦流れの生成は、結果的に反射波や透過波の低減など波エネルギーの消散や、発生する渦流れの非対称性により、堤体下部に設けた通水路に平均流を誘起して、港内外の海水交換を可能にしている。

このような遊水室開口部からのジェット流およびそれに伴う渦流れの生成状況を示すのが写真-1である。水位条件は、低潮位の場合に相当し、(a)が遊水室内の水位が上昇するとき、(b)が下降するときに対応する。これらの写真に見られるように、遊水室の水位が上昇すると



(a) 水位上昇時



(b) 水位下降時

写真-1 開口部からのジェット流発生状況 (LWL 規則波  $T=2.3s$ ,  $H=10cm$ )

き、前面カーテン壁の背後に反時計回りの渦が形成される。そして、同水位が下降するとき、この渦が遊水室外に掃き出されると同時に写真中に模式的に示すように遊水室底版に沿うジェット流により強化され、この強い渦がマウンド表面付近に作用する様子が見取れる。

なお、ここでの作用波の条件は、後に紹介するが、複数のマウンド被覆ブロックが飛散した条件に相当しており、上記したような渦流れの挙動がマウンド被覆材の移動に強く影響したものと考えている。ここでは、写真中に見られるように、引き波時に、遊水室内の水面が前面カーテン壁の下端よりも低くなるなど、特異な状況ではあるが、現実的にはあり得るものと考えている。

(2) 消波特性および堤体周辺の流速場

a) 反射率・透過率

図-3は、低潮位での海水交換堤と不透過堤の反射率 $C_r$ の比較を波長・マウンド上水深比 $L/h_a$ による変化で示す。図中では、波高 $H$ による差異が検討できるように、 $H=15cm$ を境界として二分してある。海水交換堤では、従来の研究(中村ら, 2003)に見られるように、原理的に反射率と波長・遊水室幅比 $L/B_w$ の関係で整理すべきであるが、不透過堤との比較であるため、 $L/h_a$ を用いた。なお、マウンド上水深 $h_a$ と遊水室幅 $B_w$ は、低潮位するとき、それぞれ26cmと25cmとほぼ等しいことを付記

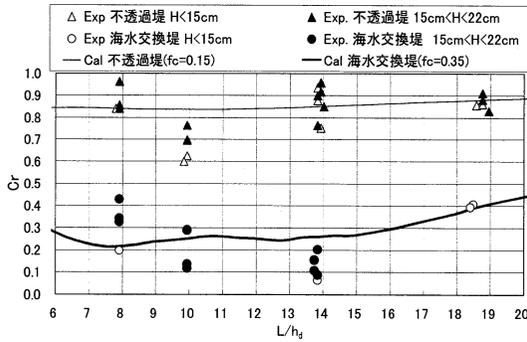


図-3 海水交換堤と不透過堤の反射率  $C_r$  (LWL 規則波)

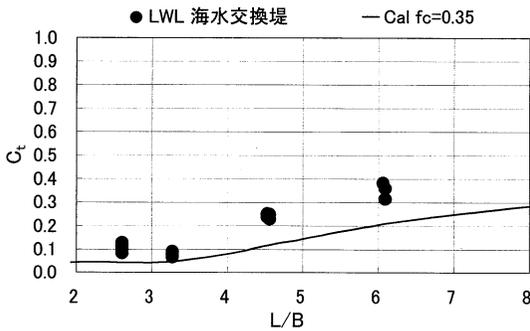


図-4 海水交換堤の透過率  $C_t$  (LWL 規則波)

しておく。

図中には、実験結果と渦流れなどの発生による波エネルギーの逸散を近似的に考慮する減衰波理論 (中村ら, 1997) による算定結果についても示す。算定で必要とされる線形抵抗係数  $f_c$  は、不透過堤では従来の研究 (中村ら, 2003) に準じて  $f_c=0.15$  を用いた。海水交換堤では、各種の  $f_c$  値を採用した検討の結果、実験結果との対応がよいと考えられる  $f_c=0.35$  の結果について示した。海水交換堤では、没水平版上の水深が浅くなる低潮位の条件時において、 $f_c=0.35$  程度と比較的大きな  $f_c$  値を採用する必要があるなどが指摘されている (中村ら, 2003)。

一方、海水交換堤の反射率と不透過堤のそれを比較すると、海水交換堤の反射率は1/3程度以下と低く、海水交換堤は有意な反射波の低減機能を持つことがわかる。また、反射波の低減効果に及ぼす作用波高の大小の影響は顕著でないことも確認できる。

図-4は、海水交換堤の透過率  $C_t$  の実験結果と算定結果の比較を示す。図中では、透過率に密接に関係すると考えられる、波長・堤体幅比  $L/B$  で整理してある。この図から、海水交換のための通水部の存在の影響により、長周期の条件になると透過率は増大する傾向にある。そして、算定結果は、実験結果を下回る傾向にあり、透過率の予測には、線形抵抗係数  $f_c$  が大き過ぎることによる

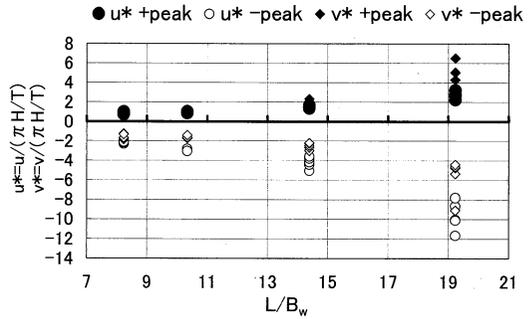


図-5 流速計①の水平・鉛直流速の正負ピーク値 (LWL 規則波)

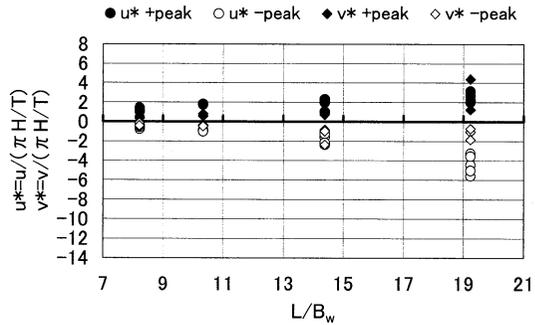


図-6 流速計②の水平・鉛直流速の正負ピーク値 (LWL 規則波)

と考えられる。

b) 堤体周辺の流速場

図-5は、海水交換堤の遊水室開口部の流速計①による水平・鉛直流速の正負ピーク値  $u, v$  の波周期による変化を検討した結果である。図中では、 $u, v$  を進行波による水平流速振幅に比例する量 ( $= \pi H/T$ ) で除した無次元流速  $u^*, v^*$  と波長・遊水室幅比  $L/B_w$  で示す。  $u, v$  の正方向は、 $u$  が岸向き、 $v$  が鉛直上向きである。

この図より、水平方向  $u^*$  の正負ピーク値は、長周期側に移行するにつれて、指数関数的に増大することが確認できる。特に負のピークすなわち冲向き方向への流速は、岸向き方向のそれに比べて約2~3倍と卓越した大きさを示すようになる。一方、鉛直方向  $v^*$  も長周期側で増大する傾向にあるが、正負の絶対値に有意な差は見られない。

このような流速振幅の増大は、遊水室内の水塊の出入のタイミング、すなわちピストンモード波浪共振に起因する開口部ジェット流の強化による影響と考えられる。

図-6は、前面マウンド上に設置した流速計②による水平・鉛直流速の正負ピーク値の測定結果を示すが、やはり長周期側で増大するなど、定性的な変動傾向は、遊水室開口部での流速と類似している。また、最も長周期側の条件下では、マウンド被覆材の真上で底部境界に近い

にもかかわらず、 $u^*$ 、 $v^*$ の絶対値は比較的大きいことが確認できる。そして、このような有意な大きさの流速振幅が被覆材の移動に関与するものと推測され、直接的な要因としては、遊水室開口部からのジェット流による影響と言えよう。

#### 4. マウンド被覆材の耐波安定性

##### (1) 被覆材被災状況の分類と定義

マウンド上の被覆ブロックの移動状況は、中村ら(1992)による移動形態の分類を参考にして、以下のLEVEL 1から4に分類した。LEVEL 4の被災が進行性で最も甚大な被災に相当する。

①LEVEL1：被災なし、②LEVEL2：初期設置不良などによる被覆材のロッキング運動などが見られるが、全

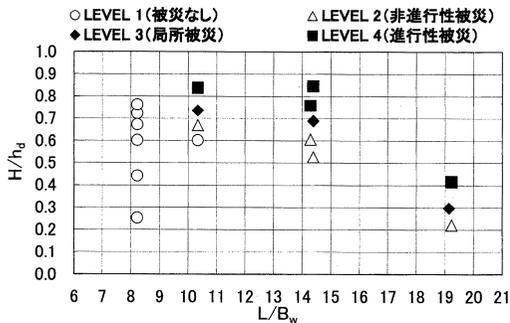


図-7 被覆材の被災状況 (海水交換堤 LWL 規則波)

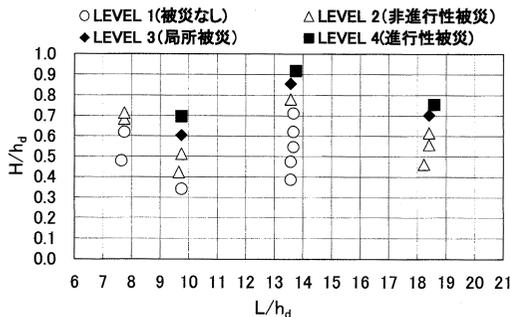


図-8 被覆材の被災状況 (不透過堤 LWL 規則波)

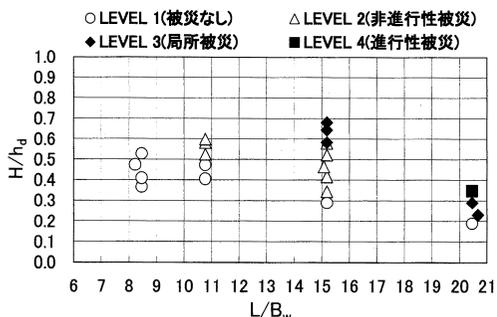


図-9 被覆材の被災状況 (海水交換堤 MWL 規則波)

体的には安定、③LEVEL3：被覆材の平行移動による隙間の拡大などにより、一部の被覆材で滑動やロッキング運動が見られる(局所被災、被害率1~2%)。④LEVEL 4：被覆材の滑動やロッキング運動が顕著で、飛散に到る被災(進行性の被災、被害率3%以上)。

##### (2) 低潮位時における被覆ブロックの耐波安定性

図-7、8は、それぞれ海水交換堤と不透過堤のマウンド被覆材の被災状況を、作用波の波高と周期に着目して検討した結果である。図中で作用波高は、マウンド上水深との比 $H/h_d$ で表し、周期については、波長・遊水室幅比 $L/B_w$ あるいは波長・マウンド上水深の比 $L/h_d$ で示す。なお、マウンド上水深 $h_d$ と遊水室幅 $B_w$ は、低潮位

のとき、それぞれ26cmと25cmとほぼ等しい関係にある。両結果を比較して、被災が甚大なLEVEL4の現れる限界波高は、不透過堤より海水交換堤の方が低いことが確認できる。特に海水交換堤では、長周期側で限界波高が低くなる傾向が見られ、不透過堤のその1/2程度である。また、被覆材の被災状況のビデオ画像解析による検討から、不透過堤は台形マウンドの法肩付近の特定列の被覆材が被災を受けるのに対し、海水交換堤では遊水室開口部からの渦流が作用する堤体に近い前面付近の被覆材が比較的広い範囲で持上げられるように被災を受けることなどを確認している。このような海水交換堤のマウンド被覆材の被災は、図-5、6で示した流速場の特性、すなわち長周期の条件下で流速振幅が顕著に増加することと密接に関係していると考えられる。

##### (3) 平均潮位時の被覆材の耐波安定性

図-9は、平均潮位時の海水交換堤の被覆ブロックの被災状況の結果を示す。低潮位時の図-7と比べると、最も長周期の条件を除けば、耐波安定性は向上することが認められる。これは、前面垂下版の吃水深が深くなると、遊水室開口部からのジェット流および渦の規模が小さくなり、結果的にそれらのマウンド上被覆材に与える影響も弱くなったためと考えられる。

しかしながら、最も長周期の条件では、低潮位時と同等の波高で被覆材が被災する結果となった。この理由としては、堤体周辺の水平および鉛直流速ピーク値が長周期側で指数関数的に増大することを考慮すると、やはり遊水室内でのピストンモード波浪共振によるものと推測される。

##### (4) 不規則波に対する結果

図-10、11は、低潮位時の不規則波に対する被覆材の被災状況の結果を、それぞれ海水交換堤と不透過堤について示す。代表波として有義波を用いており、有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期に対応する波長 $L_{1/3}$ を用いて、規則波のときと同様に被災状況の分類を行った。図-7に示す海水交換堤の規則波の結果と比較すると、図-10の不規則波

では有義波を用いているため、結果的に被災限界波高は低下する傾向にある。

また、短周期側では、不規則波の場合に比較的低い波高で被災が生じやすくなる傾向が認められる。これは、図-7に示す規則波の結果から考えて、有義波の波群中に含まれる長周期の波が影響したものと考えられる。

次に図-11の低潮位で不規則波に対する不透過堤の被災状況の結果に着目すると、やはり被災限界波高は、不規則波の場合に低下する傾向にある。そして、図-10に示す海水交換堤に対する結果と比較すると、規則波のときと同様に、長周期側での被災限界波高の差異が大きい。全般的に見て、海水交換堤の被災限界波高は、規則波のときと同様に不透過堤の約1/2程度と低いことが認められる。

### (5) 安定数 $N_s^3$

図-12は、ブレブナー・ドネリーの式を適用して求めた規則波に対する海水交換堤の安定数  $N_s^3$  をマウンド上水深波高比  $h_d/H$  で示す。図中に見られるように、20程度の極めて低い安定数が現れ、バラツキの大きいことが分かる。これは、上記したように長周期側で被災限界波高が有意に低下することによるものであり、安定性に及ぼす波周期の影響が考慮されていないことによるものと言えよう。このことから、何らかの形式で波周期の影響をも取り込んだ被災材の所要質量の算定式が必要と考えられるが、これについては今後の課題としたい。

## 5. 結語

(1) 海水交換堤の反射率は、不透過堤のその約1/3程度とかなり低く、十分な低反射機能を有する。また、堤体下部に設けた通水部を介しての透過波はそれほど大きなものでなく、防波堤としての機能を維持できる。

(2) 海水交換堤は反射率が低いにも関わらず、マウンド被災材の被災限界波高が不透過堤の場合より低くなる。この傾向は、特に長周期側で顕著であり、海水交換堤の遊水室開口部からの流出速度のピーク値が、長周期側に移行するにつれて指数関数的に増大することによる。

(3) 海水交換堤のマウンド被災材の耐波安定性は、設置水深が深くなると全般的に改善される傾向にあるが、長周期波に対する安定性の改善にはそれほど寄与しない。

(4) 不規則波に対する海水交換堤のマウンド被災材の被災限界波高は、規則波のそれよりも低い。これは、有義波を代表波とすることにもよるが、波群に含まれる長周期波の影響も強いことによると考えられる。

本研究は、(財)災害科学研究所に設けた「沿岸新技術研究会」で検討を進めている海水交換防波堤に関係する研究課題の一つであり、研究を進めるに当たり、各種の

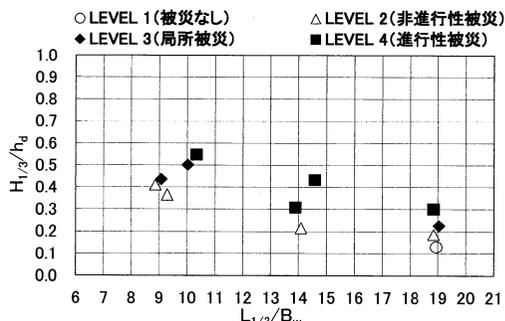


図-10 被災材の被災状況 (海水交換堤 不規則波 LWL)

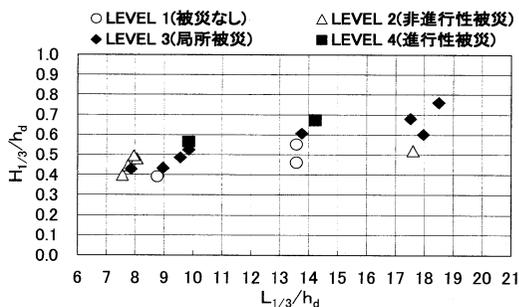


図-11 被災材の被災状況 (不透過堤 不規則波 LWL)

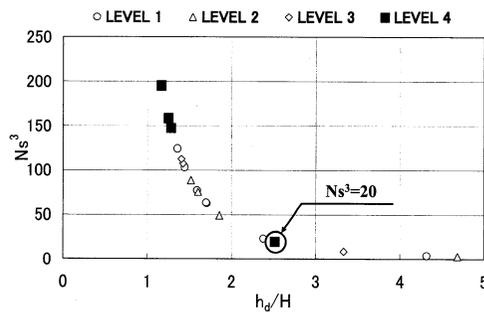


図-12 安定数  $N_s^3$  (海水交換堤 規則波 LWL)

ご指導をいただいた研究会のメンバーの方々に感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 中村孝幸・小野塚孝・加藤孝輔・森貴人 (1992) : 人工リーフ上の被覆ブロックに作用する波力の特性について, 海洋開発論文集, 第8巻, pp.68-74
- 中村孝幸・井出善彦 (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・高木伸雄・中山哲蔵・河野徹 (2002) : ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過の海水交換防波堤の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.661-665.
- 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, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.806-810.