

波による渦流れを利用する海水交換防波堤の 港湾域における効果について

中村孝幸*・大村智宏**・槇本一徳***・大井邦昭****

波浪制御効果と海水交換促進効果を併せ持つ防波堤として、波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の開発を行ってきた。本研究では、最初に、この遊水室型海水交換防波堤の基本的な特性を、遊水室のない下部通水型矩形堤のそれとの比較などから明らかにした。引き続き、この遊水室型防波堤の港湾域における効果を知るため、平面水槽内に模擬港湾を構築し、外郭防波堤の一部に遊水室型防波堤や下部通水型矩形堤を用いるときの静穏化効果や海水交換効果などを主に実験的に比較検討した。その結果、外郭防波堤の一部を遊水室型海水交換防波堤とすることで、港内に有意な平均流が生成され、港内の浄化に有効であることなどが明らかになった。

1. はじめに

港湾、漁港は厳しい波浪環境下にある場合が多く、船舶や漁船の接岸、係留荷役の安全性を確保するために、防波堤など外郭施設の整備により、港湾の静穏度を維持する必要がある。しかしながら、静穏度を重視するあまり、港内外の海水交換をも阻害してしまう傾向にあり、港内の水質・底質環境の悪化の要因の一つになっている。この対策として、最近ではより積極的に海水交換を促進する防波堤の整備も進められている。その際、防波施設としての本来の機能を維持しつつ、効果的に海水交換を促進する構造体が望まれる。このような背景のもと、既に著者ら(中村ら 2003)は、図-1に示すような垂下版と没水平版で構成される遊水室型の海水交換防波堤を提案すると共にその波浪制御効果および海水交換機能などを明らかにしてきた。

本研究では、模擬港湾を想定して、その港奥の一部に上記した遊水室型海水交換防波堤(以下、遊水室型防波堤と称する)や従来形式の下部通水型矩形堤(以下、通水型矩形堤と称する)などを設置するときの海水交換特性や港内静穏度について、主に実験的に明らかにする。この際、擬似 2 次元水路による断面 2 次元的な結果との比較も行う。また、より効果的な港内における海水交換を可能にするため、波除堤を兼ねた導流堤による平均流の流向制御の効果についても検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 断面 2 次元的な検討

a) 模型堤体および擬似 2 次元水路

模型堤体は、図-1に示す堤体幅 $B=50$ cm、遊水室幅 $B_w=25$ cm の遊水室型防波堤を基本型堤体として用い

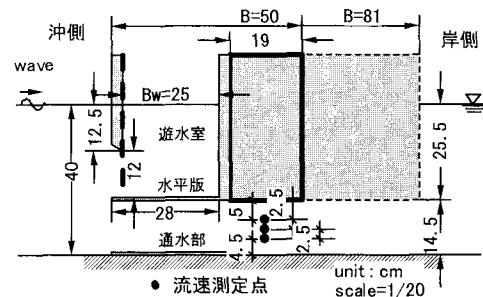


図-1 遊水室防波堤の構造諸元と流速計測点

た。これ以外に、耐波安定性を増すため堤体背後の重量部の長さのみを延長した模型も用いた。一方、比較実験として、従来において海水交換防波堤として用いられている通水型矩形堤を再現するため、遊水室前面の垂下版下部の開口部を図中の太い点線で示すように鉛直板で閉じた模型も用いた。実験では、後述する擬似 2 次元水路の幅(2.5 m)に合せて、合計 5 基の堤体ユニット(1 ユニット長 0.5 m)を設置した。実験で想定した模型の縮尺は 1/20 程度である。

実験で用いた長水路は、図-1に示す平面水槽内に、波向き方向に平行配置した 2 組の剛な隔壁板を用いて、水路幅 2.5 m、長さ 15 m の擬似 2 次元水路を作製して用いた。この長水路は、造波機側の沖側を開放状態、岸側を通水性の高いヘチマロン製の消波工としており、水路内に生成される平均流をなるだけ阻害しない構造としてある。なお、この平面水槽の終端側には、反復反射の影響を少なくするため、碎石とヘチマロンで構成される消波工を設けた。

b) 測定装置

模型堤体による波変形の測定には、計 4 台の容量式波高計を使用した。このとき、入射波測定用に 1 台、入・反射波の分離用に 2 台、堤体の透過側に透過波測定用に 1 台を充てた。

堤体下部の通水部では、平均通水量などが検討できる

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科

** 正会員 工修 (独法)水産総合センター水産工学研究科

*** 正会員 工修 復建調査設計株式会社 松山支店

**** 正会員 工修 技研興業株式会社 技術研究部

ように、計3台の電磁流速計を図-1中に示すように鉛直方向に異なる3点に設置して、水平流速を測定した。

c) 実験条件

実験で用いた水深 h は40 cm、作用波は規則波で、その入射波高 H が5 cm, 10 cm の2種類、周期 T が1.2~2.0 sの範囲内で7種類を選定した。

(2) 模擬港湾を想定した平面実験

a) 実験水槽と模型港湾

この実験では、図-2に示す平面水槽を用いた。水槽内には、漁港を模擬した港湾模型を設け、その外郭防波堤の一部に図-1の基本型の遊水室型防波堤5基(2.5 m分に相当)を設置した。このとき、港内の平均流の流向制御を目的として、図中に示すように遊水室型防波堤と港口部の間に波除堤を模擬した不透過壁を設けた場合についても検討した。

また、比較実験のため、遊水室型防波堤を通水型矩形堤および不透過堤に変更した場合も同様に検討した。この実験で用いた堤体の幅 B は、周辺防波堤との連続性を考慮して、全て $B=50$ cmとした。想定した模型の縮尺はやはり1/20程度である。

b) 測定装置

港内静穏化効果は、図-2中に示すように、港内泊地の計44測点において波高測定を実施した。また、港湾域の平均流は、球形トレーサによる流況観測ならびにカオリン粘土を濁度に用いた希釈実験の両者により把握した。この際、濁度の希釈実験には濁度計6台を、流況観測には水槽上部からのビデオカメラ撮影およびその解析用にデジモ社の画像解析ソフトPTVを用いた。

c) 実験条件および実験方法

実験に用いた作用波の条件は、断面2次元の実験結果

との比較が可能となるように、断面2次元実験で用いた波条件の中から代表的なものを選定した。この平面実験では、規則波のみならず実際場を想定して一方向不規則波も用いた。不規則波は、有義波での波高 $H_{1/3}=5, 7$ cm、周期 $T_{1/3}=1.3, 1.4, 1.8$ sの計6種類の組み合わせとした。このとき、水深 h は、断面2次元実験と同様に40 cmに固定した。

実験は、港内静穏度の検討実験、流況の観測実験および港内濁度の希釈実験の三者で独立に実施した。港内濁度の希釈実験では、最初に港口部を含む港湾開口部を閉じた状態下で、カオリン粘土による濁度が港内で均一濃度となるようよく攪拌しておき、波の作用開始と同時に開口部を開放した。そして、総時間で90分にわたり継続して波を作らせ、濁度の希釈度合を連続的に測定した。

3. 理論算定法

本研究では用いた堤体まわりの断面2次元的な波変形の算定には、中村・井出(1997)により展開されている線形ボテンシャル波動理論に基づく減衰波理論を用いた。このとき、算定に必要となる線形減衰係数は従来の研究(2003)を参照して0.2とした。

一方、港湾域まわりの平面的な波変形の算定には、中村・佐伯(1999)による鉛直線グリーン関数法に基づく方法を用いた。この算定法では、港湾境界の反射特性や透過特性を近似的に考慮して港湾内外の波高分布が算定できる。

4. 波浪制御効果について

(1) 反射波・透過波の低減効果について

図-3, 4は、堤体幅 $B=50$ cmのときの遊水室型防波

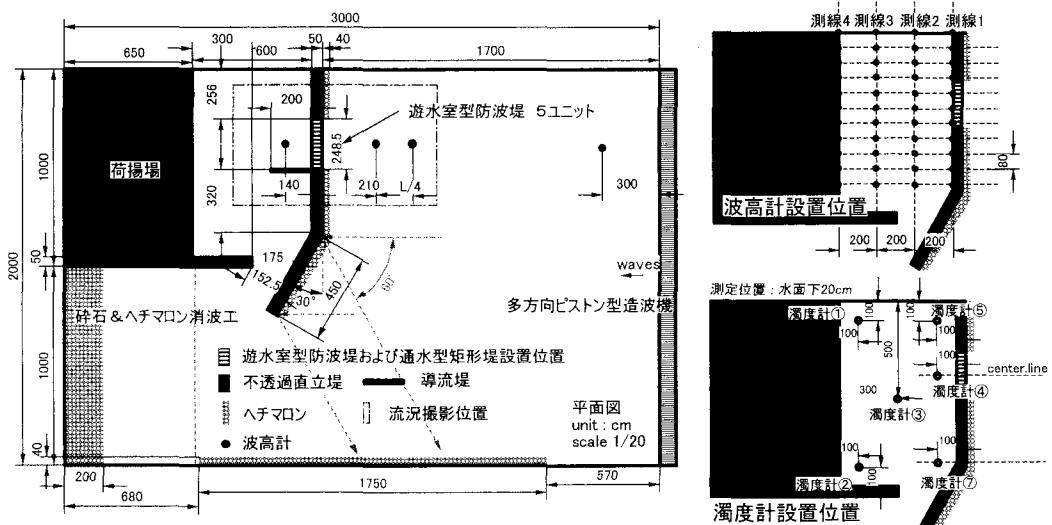


図-2 模擬港湾の構造諸元および濁度計、波高計、擬似2次元水路の設置状況

堤および通水型矩形堤の反射率 C_r および透過率 C_t の波周期による変化を示す。周期に関する無次元量は、波長堤体幅比 L/B を用いた。図中には、断面2次元実験結果に加え、平面実験および算定結果も併せ示す。

この図から、遊水室型防波堤は通水型矩形堤に比較して、ほぼ全ての周期帯において反射率 C_r と透過率 C_t の両者が低くなることが分かる。このような傾向は、算定結果においても認められる。特に遊水室型防波堤の反射率は、特定の L/B の条件下で極小となるなど、その低減効果が著しい。このような極小反射率の出現は、既に明らかにされているように（中村ら、2003）、遊水室内のピストンモードの波浪共振による垂下版下部よりの強い渦流れの発生による。また、断面2次元の実験結果と平面実験のそれとを比較すると、両者はほぼ一致しており、平面波浪場でも遊水室型防波堤の効果が同様に發揮できていることが確認できる。

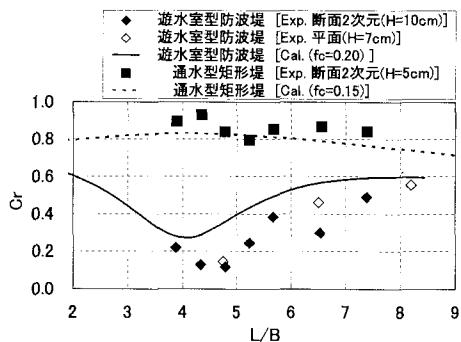


図-3 反射率 C_r の特性 ($B_w = 25 \text{ cm}$, $B = 50 \text{ cm}$)

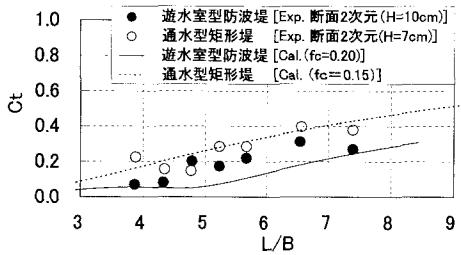


図-4 透過率 C_t の特性 ($B_w = 25 \text{ cm}$, $B = 50 \text{ cm}$)

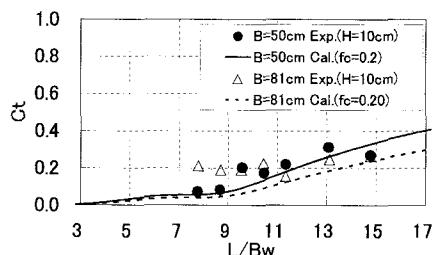


図-5 堤体幅 B を変化させたときの透過率 C_t
(断面2次元, $B_w = 25 \text{ cm}$)

図-5は、遊水室背後の重量部の長さを延伸して堤体幅 $B = 81 \text{ cm}$ としたときの透過率 C_t の結果を、基本型のそれとの比較で示す。図中では、横軸に波長と両堤体で同一の遊水室幅 B_w の比を用いた。この図より、透過率は絶対値の小さな短周期側では、測定誤差によると考えられるバラツキが見られるものの、 L/B_w が10以上の長周期側において、実験、算定結果とともに堤体幅を増加させると透過率 C_t は小さくなる傾向にあることがわかる。これは、下部通水路長を増加させることで、背後域へ波運動が伝わりにくくなることによると考えられる。このように、堤体幅を増加させることで、耐波安定性のみならず透過波の低減効果も増すことが分かる。一方、堤体幅による反射波の低減効果への影響は、ほとんど見られないことが確認されている。これは、堤体前面の遊水室の諸元が反射波の低減に卓越した影響を持つことによると考えられる。

(2) 港内の静穏化効果について

図-6は模擬港湾に遊水室型防波堤および通水型矩形堤を設置した場合並びに堤体構造を全て不透過堤とした場合の港内平均波高比を示す。港内平均波高比は港内側の各測点（港口部を除く）における波高 H_x と入射波高の H の比の空間平均値とした。図中には、規則波と不規則波を用いた実験結果および算定結果を併せて示す。

この図の規則波の結果に着目すると、 L/B の小さな短周期側で港内波高は比較的大きく現れているが、これは港内水域の平面寸法と波長に関係する湾水振動によるものと考えられる。特にここでは、港内側の周辺境界の反射率が高反射条件になっているため、このような傾向が比較的強く現れたものと推定される。

このときの堤体構造による比較を行うと、 L/B が6.5程度の条件下では構造体による差異はほとんど見られないが、さらに長周期の条件になるとやはり不透過堤の場合が静穏化効果は最も高い。これは透過構造のとき、図-4に示すように長周期側になると透過率が上昇するた

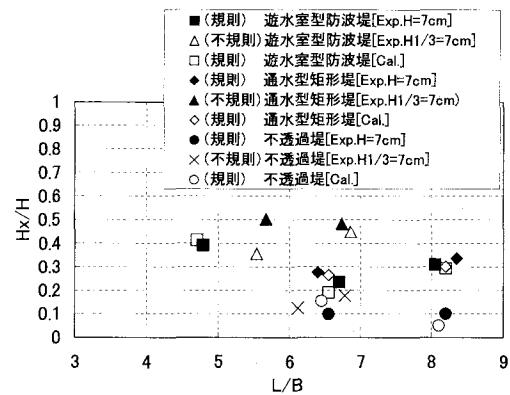
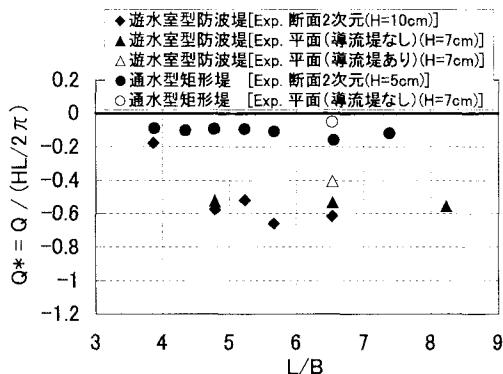
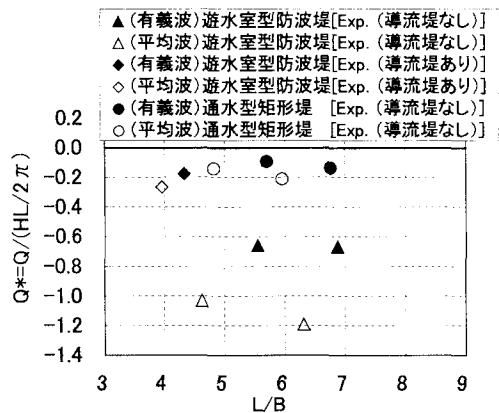


図-6 港内平均波高比

図-7 規則波に対する輸送流量 Q^* 図-8 不規則波に対する輸送流量 Q^* (平面実験 ($H_{1/3}=7\text{ cm}$)

めと考えられる。そして、遊水室型防波堤と通水型矩形堤の結果を比較すると、両者には有意な差が認められない。

一方、不規則波の作用下では、透過構造のとき、静穏化効果は低下する傾向にある。これは、不規則波では各種の周期成分波を含むことから、上記した湾水振動の影響を受けやすく、港内波高が増加するものと推定される。

このように外郭防波堤の一部に透過構造の防波堤を用いるときには、ある程度の透過波の影響は避けられず、港内の低反射構造あるいは計画段階での湾水振動の特性の把握などが必要と考えられる。

5. 海水交換機能について

(1) 通水機能の定量的な検討

図-7は、遊水室型防波堤および通水型矩形堤の通水部において計測した水平流速から求めた無次元輸送流量 Q^* を示す。図中には、断面2次元実験結果に加え、平面実験結果も併せて示し、それらの L/B による変化を示す。 Q^* は単位幅輸送流量 q を進行波による半周期間にの移動水塊量 $HL/2\pi$ で除したものである。ここでは沖向きへの流れを負と定義している。

この図より、遊水室型防波堤は、1波あたりの無次元平均流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れることがわかる。この海水交換機能は、通水型矩形堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。そして、遊水室型防波堤の輸送流量は、長周期側になると増大する傾向にあることなども認められる。

一方、断面2次元実験と平面実験の輸送流量の結果を比較すると、防波堤形式に関係なく両結果はほぼ等しく、平面波浪場の港湾域でもほぼ同等の効果が得られることが分かる。ただし、模擬港湾に導流堤を設置した場合、1割程度の輸送流量の減少が見られる。これは、導流堤を設置することで、港内の平均流に対する負荷が大きくなり、結果として輸送流量が減少したものと考えられる。

図-8は模擬港湾における不規則波実験に対する平均輸送流量の結果を示す。無次元輸送流量 Q^* の算出には、平均波および有義波の諸元の両者を用いて求めてみた。この図より、遊水室型防波堤と通水型矩形堤の輸送流量の実験結果を比較すると、規則波の場合と同様に、遊水室型は有意な海水交換機能を持つことが確認できる。また、図-7の規則波に対する平面実験結果と比較すると、不規則波に対する輸送流量は、遊水室型防波堤、通水型矩形堤とともに、不規則波の代表波として有義波を用いる方が両結果の対応のよいことが認められる。

(2) 港湾域の流れについて

図-9、10は、模擬港湾において観測した港湾域のフロートの移動軌跡を示す。図中の軌跡は、2sごとにプロットしており、計300s間の流跡線を示す。また、図中には代表的な地点における、フロートの移動距離と時間から求めた無次元の平均表面流速 U^* を示す。 U^* は、進行波の静水面位置での水平流速振幅 ($= \pi H/T \cdot \coth(kh)$) で無次元化した量に相当する。

これらの図より、遊水室型防波堤を設置した場合、港口部(図中の中央下方)より港内に向かって水が流入し、防波堤より港外側に流出する様子が確認できる。また、港口部よりの流入水の一部は、港内で循環流を形成することも認められる。

陸域側港奥への港外水の導入を目的として、波除堤を兼ねた導流堤を設置すると、図-10に見られるように、導流堤に沿い湾奥に向かう流れが形成され、設置しない場合と比較して循環流の回転方向が反対になるなど、港内の流況は大きく異なるようになることが分かる。このような検討から、港内の海水交換を効果的に進めるには、断面2次元的な海水交換機能のみならず港内での平均流の平面的な流況を考慮した港内施設の配置等の検討が重要になると言える。

図-11は、模擬港湾における複数測定点の濃度変化の平均値を各波条件について示す。図中では、濃度を造波

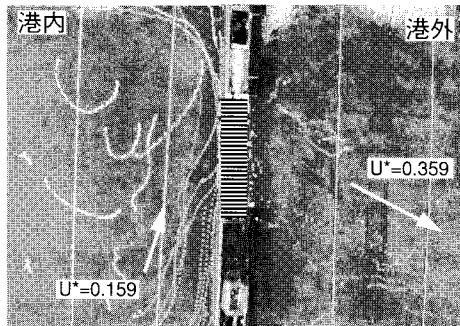


図-9 遊水室型防波堤付近の流況(導流堤なし)
($T=1.8\text{ s}$, $H=7\text{ cm}$ 露出間隔2s毎に300s間)

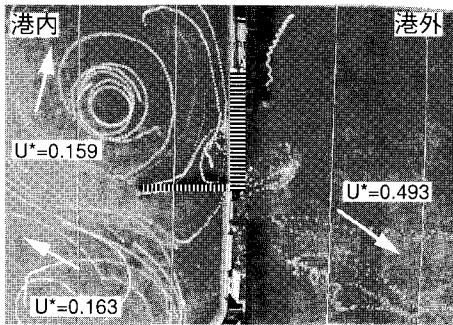


図-10 遊水室型防波堤付近の流況(導流堤あり)
($T=1.8\text{ s}$, $H=7\text{ cm}$ 露出間隔2s毎に300s間)

開始時の初期濃度で除した無次元濃度 C_a の作用波数による経時変化を示す。この図より、通水型矩形堤と不透過堤の場合には明らかに濃度の低下が遅く、遊水室型防波堤を設置した場合には、順次濃度が低減されていることがわかる。

また、港湾に導流堤を設置した場合、上記の表層流況の検討により、導流堤を設置しない場合と比較して、港内の循環流の流向変化の影響が明確に現れることから、港奥における濃度低下も早くなる傾向が確認されている。しかし、導流堤の設置の有無にかかわらず、遊水室型防波堤を設置した場合には、ほぼ全ての測点において濃度の低減が確認され、効果的な海水交換が可能であると考えられる。

図-12は遊水室型防波堤で導流堤を設置した場合の不規則波における濁度変化の実験結果を示す。図中には、代表的な測点の濃度変化とそれらの平均値を併せ示しており、経過時間を有義波周期で除した有義波波数による変化で示す。この図から、不規則波に対しても規則波と同様に順次濃度が低減されており、効果的な海水交換が可能であると考えられる。

6. 結 語

(1) 波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤は、規則波および不規則波に関係なく、1波あたり

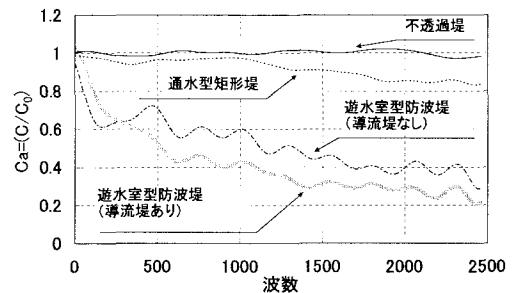


図-11 港内の濃度変化(規則波, $T=1.3\text{ s}$ $H=5\text{ cm}$)

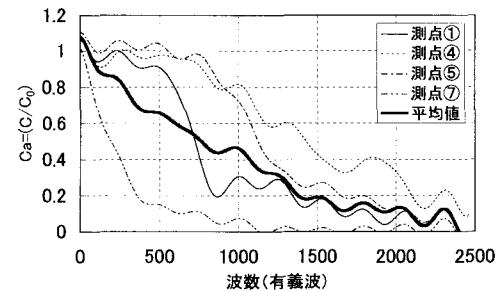


図-12 港内の濃度変化(不規則波, $T^{1/3}=1.3\text{ s}$ $H^{1/3}=5\text{ cm}$)
遊水室型防波堤(導流堤あり)

の無次元平均流量が0.6以上であるなど、海水交換機能に優れる。この海水交換機能は、従来のケーソン堤下部を通水式とする海水交換防波堤と比較すると、5倍以上の能力に相当する。なお、不規則波の代表波としては、有義波を用いると規則波の結果との対応が良い。

(2) 港湾の外郭施設である防波堤の一部を遊水室型海水交換防波堤とすることで、港内に有意な平均流が発生し、港内水の浄化に対して有効である。このとき、港内の海水交換を効果的に進めるには、断面2次元的な海水交換機能のみならず、港内での平均流の平面的な流況を考慮した、波除堤や導流堤など港内施設の平面配置も重要ななる。

(3) 港湾の防波堤の一部を遊水室型海水交換防波堤としても、港内の静穏化効果はある程度維持できる。しかし、低波高といえども透過波の影響は無視できず、港内側境界の低反射構造化などが望ましい。

参 考 文 献

- 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で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 (1999) : 透過堤を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 339-344.
- 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭 (2003) : 游水室型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.