

没水平版を有する傾斜版列型杭式防波堤の港湾域における効果について

Effectiveness of a Pile-Supported Breakwater with an Inclined-Plate-Array
and a Submerged Plate in a Harbor

楨本一徳¹・中村孝幸²・中山哲巖³・武内智行⁴・中村英輔⁵

Kazunori MAKIMOTO, Takayuki NAKAMURA, Akiyoshi NAKAYAMA
Tomoyuki TAKEUCHI and Eisuke NAKAMURA

We have proposed a new type breakwater supported by piles, which consists of three major parts, i.e., an inclined plate array as a front wall, a vertical rear wall and a submerged plate at the base. It has been confirmed by the two-dimensional experiment that it enables to reduce both reflected and transmitted waves and also induce the mean current about the breakwater. In this study, we have carried out experiments on the performance of this type of breakwater in the three dimensional fields. For the comparisons, conventional breakwaters, such as a curtain-walled breakwater and also a vertical breakwater, were also used as a breakwater model. For the theoretical prediction of nearshore circulation around the harbor, applicability of the numerical analysis based on the Multi-Layered model was extensively examined.

1. はじめに

近年、防波堤の延伸に伴い、湾奥の水質悪化が問題視されるようになってきている。特に漁港は、物揚場での魚貝類の解体・洗浄などに伴う汚水の排水や、港内における畜養施設の設置など、汚濁負荷の大きい海域となっている。このため、港内浄化を目的とする海水交換型防波堤の新設が必要とされている。そのような中で、著者ら(2006)は、前面壁を傾斜版列とする二重式カーテン防波堤の遊水室下部に没水平版を設ける構造形式(以下傾斜版列防波堤)を提案した。この形式の海水交換防波堤は、従来の越波方式のものに比較すると、遊水室前面の渦流れを利用して平均流を誘起するため、潮位差の影響を受けることなく、海水交換機能が發揮できることや、高い消波効果(反射・透過波の低減)を有することなどの特長を持つ。

しかしながら、当構造形式の防波堤を実海域に適用するには、防波堤の平面的な配置に伴う港湾域の海水交換の効果を確認しておく必要がある。本研究は、このような平面的な効果を検討するため、模擬港湾を対象にして平面波浪場での実験および理論解析を行い、傾斜版列防波堤の有効性を明らかにする。また、比較のため、カーテン防波堤や不透過堤を港湾に用いるときの効果についても検討する。

2. 堤体模型及び実験方法

(1) 港湾モデル及び堤体模型

実験には、(独法)水産総合センター水産工学研究所の

- 1 正 会 員 工 修 復建調査設計(株) 松山支社 設計課
- 2 正 会 員 工 博 愛媛大学大学院准教授理工学研究科
- 3 正 会 員 工 修 水産総合研究センター水産工学研究所
- 4 正 会 員 農 博 水産総合研究センター水産工学研究所
- 5 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科

平面波浪水槽(長さ 26.0 m×幅 10.0 m×高さ 1.0 m)を使用した。この水槽の一端には造波装置が、他端には斜路が設置してある。この平面水槽内に、図-1 に示す比較的単純な形状の港湾モデルを設置し実験を行った。このとき、沖側の外郭防波堤の全延長に対して、図-2 に示す 3 つの異なる構造形式の堤体を各々設置した。図-2(a)に示す堤体は、今回提案した傾斜版列防波堤であり、その諸元(傾斜版角度、向き、間隔等)は、従来の著者らによる断面二次元的な検討で最も効果的と判断されたものを用いた(楨本・中村, 2006)。図-2(b)は、従来、軟弱海底地盤の場合に比較的好く採用されている単一カーテン防波堤に相当する。このとき、カーテン版下端の開口部を吃水の 1 割程度(5 cm)と狭くしたのは、傾斜版列防波堤による透過波の遮断特性と類似させるためである。また、図-2(c)は不透過性の防波堤に相当す

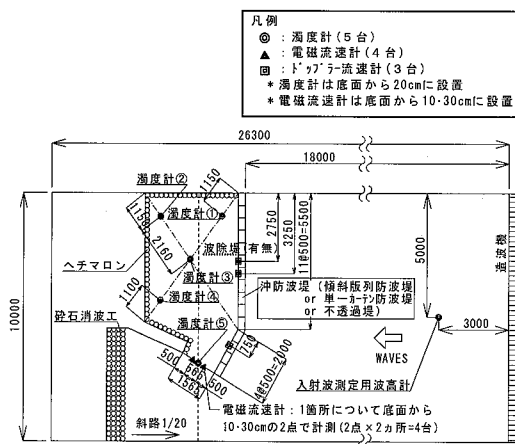


図-1 港湾モデル及び計測器設置位置
(縮尺 S=1/25, unit ; mm)

る。なお、実験に用いた模型の縮尺は $S=1/25$ とした。

(2) 実験方法

実験で用いた計測装置は、図-1に示すように①沖側での入射波測定用の波高計1台、②港内の濁度の希釈割合を測定するための濁度計5台、③防波堤の通水部での平均流の測定を目的としたドップラー流速計3台、④港口部での平均流速を測定するための電磁流速計4台である。

海水交換の状況は、主として初期に港内に投入した白色濁度の希釈度を濁度計により測定することで実施した。希釈実験では、最初に防波堤の通水部や港口部など港外に開放された部分に木製の蓋を取り付けた後に、白色濁度を投入し、港内全域にわたり十分攪拌した。これを初期状態として、所定の条件の波を作用させ、先頭の波が港湾モデルに到達すると同時に、開放部分の蓋を取り外して計測を開始した。この際、水槽上部に固定したビデオカメラにより港内外の流況についても同時に撮影した。波の作用時間は、断面二次元実験による模型防波堤の海水交換能力を参照して、1時間程度とし、この間にわたり測定を行った。この計測時間は、現地量(縮尺: $1/25$)に換算すると、約5時間に相当する。また、傾斜版列防波堤を設置した実験については、港内の波除堤の有無による港内浄化の優劣についても比較できるようにした。なお、波除堤には、下端の開口部がない単一鉛直版構造のものをを用いた。実験で用いた波条件は、規則波のみとし、入射波高 $H=5$ cm, 周期 $T=1.2$ s, 1.4 sの2種類を選定した。いずれの波条件も、常時波浪に対する海水交換の機能を把握するために用いた。この実験で使用した波条件を表-1に示す。なお、表中には、波長 L 、波長遊水幅比 L/B 及び現地換算波の諸元についても併せて示した。

3. 濁度の希釈に関する検討

図-3～6は、港内に投入した濁度の希釈割合の時間変化を示す。図中では、各時間での濁度の濃度を造波開始時の初期濃度 C_0 で除した無次元濃度 Ca として示した。このような表現方法としたのは、港内での濁度をなるべく空間的に一樣になるよう十分攪拌しているものの、多少ながら差異が見られることや濁度センサーの出力感度が機器により異なることを基準化して表現するためである。

(1) 波除堤による効果

最初に、図-2(a)の傾斜版列防波堤を対象にして、波除堤の有無の影響について検討した。これらの結果を示す図-3, 4を比較すると、一番大きな相異は、濁度計③の濁度の変化である。すなわち、波除堤が無い図-3の場合は、時間が経過しても濃度比はほとんど変化していない。これは、波除堤が無い場合、港口部から流入した湾外からの流入水が沖防波堤の背面側に沿って再び湾外に排出さ

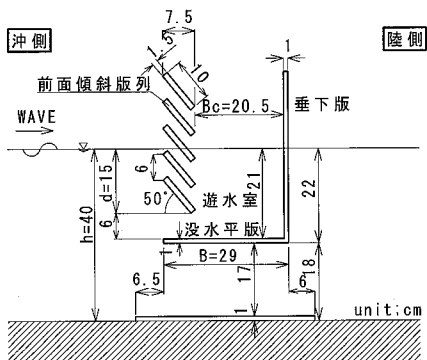


図-2(a) 傾斜版列防波堤 (縮尺 $S=1/25$, unit ; cm)

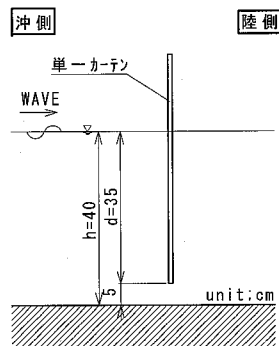


図-2(b) 単一カーテン防波堤 (縮尺 $S=1/25$, unit ; cm)

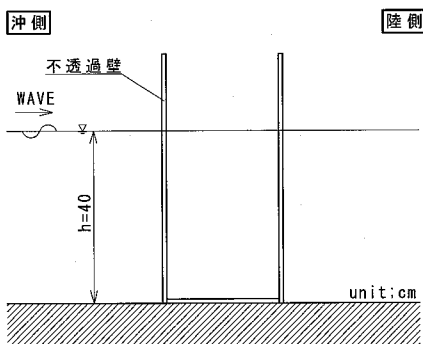


図-2(c) 不透過堤 (縮尺 $S=1/25$, unit ; cm)

表-1 実験波の条件(模型縮尺: $S=1/25$)

周期: T		波高: H		波長: L		波長堤体幅比
実験 (s)	現地 (s)	実験 (cm)	現地 (m)	実験 (cm)	現地 (m)	
1.2	6.0	5.0	1.3	194	48.4	6.68
1.4	7.0	5.0	1.3	239	59.8	8.25

れるものと、そのまま側壁に沿って湾奥への流れに2分されるためである。そのため、湾中央部に位置する濁度計③は、時間が経過しても濁度があまり変化していない。また、この傾向は、実験時に撮影したビデオからも推測できる。湾奥に位置する濁度計②, ④についても、波除

堤を設置した方が濁度の低下が早い傾向にある。濁度計⑤については、湾外からの新しい水を港内へ引き込むことになるため、両方とも早い時間に濁度が低下している。

(2) 単一カーテン防波堤との比較

図-5 は、沖防波堤の構造形式を各々傾斜版列防波堤と単一カーテン防波堤とする場合の、濁度の希釈度合の時間変化を示す。両構造形式とも、 $T=6.0\text{ s}$ に比べて $T=7.0\text{ s}$ の方が、濁度の希釈時間が早い傾向にある。これは、防波堤を介しての透過波が、周期に伴い増加するためと考えられる。また、構造形式別に着目すると、単一カーテンの場合で $T=7.0\text{ s}$ のときに濁度の希釈時間が最も短い結果となっている。これについては、やはり透過率が大いいために希釈時間が早くなっていると考えられる。(ここでは、紙面の都合上省略するが、断面二次元実験にてカーテン防波堤の反射・透過率は、傾斜版列防波堤と比べて大きいことを確認している)。単一カーテン防波堤では、防波堤前面での反射波が非常に大きくなる事などを考慮すると、傾斜版列防波堤の方が有利であると言える。

(3) 不透過堤との比較

図-6 は、沖防波堤の構造形式を各々傾斜版列防波堤と不透過堤にした場合の、濁度の希釈度合の時間変化を同様にして示す。やはり、沖防波堤を傾斜版列防波堤とした方が、濁度の希釈時間が早い。沖防波堤を不透過堤とした場合、原則的には港口部でしか港内水の交換は行われないが、希釈濃度は時間的に減少している。これは、不透過堤の底部付近にスリット孔があり、波や流れの遮断を十分に行うことができなかったことや、濁度の主成分であるカオリン粘土自体が時間経過とともに沈降したことが原因であると考えられる。しかし、双方の構造形式を比較すると、やはり、濁度の低下する時間が早い、傾斜版列防波堤の方が有利な断面であると言える。

4. 通水部における海水交換量

図-7 は、傾斜版列防波堤の堤体下部通水部で測定した水平流速から求めた無次元流量 Q^* を L/B の変化により示したものである。ここで Q^* は一波当たり単位幅当たりの輸送流量 Q を進行波による半周期の移動水塊量 $HL/2\pi$ で除した無次元流量に相当する。比較のため、図中には別途、模型断面を用いて実施した断面二次元実験において計測された流量についても示した。

この図より、平面実験及び断面二次元実験ともにほぼ同一の平均流量を示し、当構造形式の防波堤は平面波浪場においてもほぼ同様な海水交換機能を発揮できることが分かる。そして、平面波浪場での海水交換防波堤による海水交換量を推定するとき、断面二次元実験による成果を近似的に用いてもよいと言える。

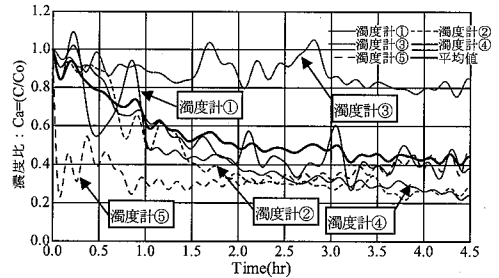


図-3 港内濁度の時系列変化
(波除堤：無， $T=7.0\text{ s}$ ， $H=1.3\text{ m}$)：現地換算

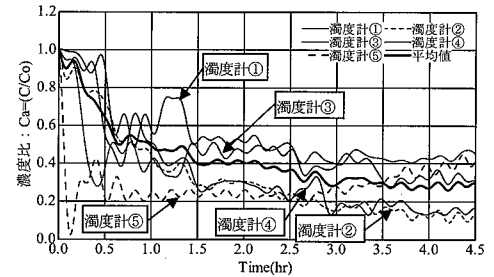


図-4 港内濁度の時系列変化
(波除堤：有， $T=7.0\text{ s}$ ， $H=1.3\text{ m}$)：現地換算

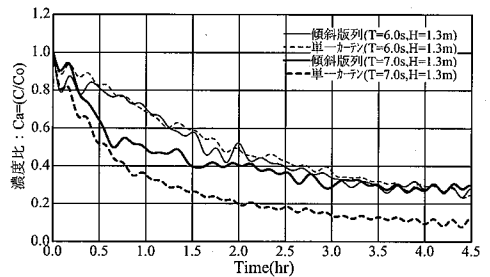


図-5 構造形式の違いによる濁度の変化：現地換算
(傾斜版列防波堤・単一カーテン) 波除堤：有

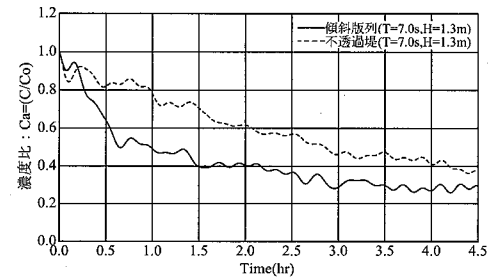


図-6 構造形式の違いによる濁度の変化：現地換算
(傾斜版列防波堤・不透過堤) 波除堤：有

5. 平面的な流況の算定

図-8～12 は、港内の流況の予測を目的として、マルチレベルモデル(藤原ら，1992)により求めた平均流の算定結果を流速ベクトル図で示す。この際、算定は現地量

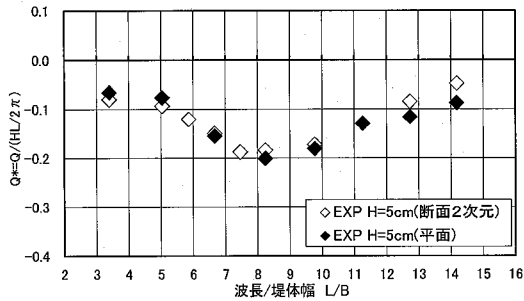


図-7 平面実験及び断面二次元実験における通水部平均流量の変化 (模型波高: $H=5\text{cm}$)

で行い、水深方向には1層モデルで近似した。また、外郭防波堤における流速境界条件は、防波堤部分で計測された平均流の流速値を強制流のそれとして与えた。

図-8, 9は、堤体の構造が傾斜版列防波堤のときで、港内の波除堤が無い場合とある場合の結果に相当する(波条件; $T=7.0\text{s}$, $H=1.3\text{m}$)。これらの算定結果より、港内に波除堤を設けると、港内中央部での平均流は早くなり、港内全体での海水交換が促進されることなどが認められる。また、このような流況特性の変化について比較するために、対応する観測結果を写真-1, 2に示す。

これらの図および観測結果の写真より、算定結果における流況は、実験結果と類似した傾向を示すなど、複雑な流況をある程度再現していることが分かる。また、図-10は、波周期 $T=6.0\text{s}$ の条件下で外郭防波堤を傾斜版列防波堤とし、波除堤を設けた場合の算定結果である。当結果についても、ここでは割愛するが、観測結果とほぼ同様の流況が再現できていることを確認している。

図-11, 12は、堤体構造が、単一カーテン防波堤の場合の算定結果を示す。図-9, 10と比較すると、沖防波堤を傾斜版列防波堤とした方が湾奥での流れが大きいことがわかる。したがって、湾奥まで海水交換を行う必要がある場合には、やはり傾斜版列防波堤の方が有利であると言える。また、当然であるが単一カーテン防波堤を採用した場合には、湾外の水を湾内に引き込む構造になっており、傾斜版列防波堤の結果に比較すると逆方向への流れを示す。また、周期の相違に注目すると、両構造形式とも長周期側に移行するほど湾内の平均流速が増加する傾向にある。このような流況特性については、実験時のビデオ観測からも確認されており、理論解析により港内の平均流の流況がほぼ再現できることがわかった。

6. 港湾モデルにおける必要設置基数の推定

ここでは、平面波浪場における海水交換防波堤の海水交換機能から、実際場のスケールを想定した場合の海水交換に要する時間について検討を行った。

本実験で想定した港湾モデルは縮尺 1/25 を想定して

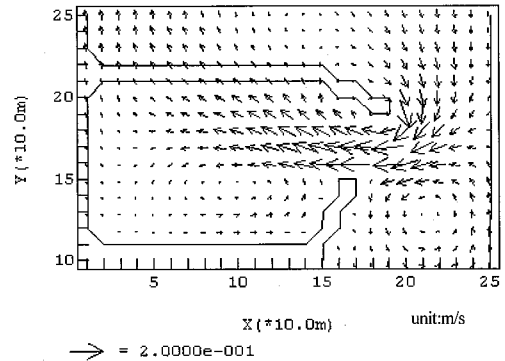


図-8 流況計算結果(波除堤: 無, $T=7.0\text{s}$, $H=1.3\text{m}$): 現地換算

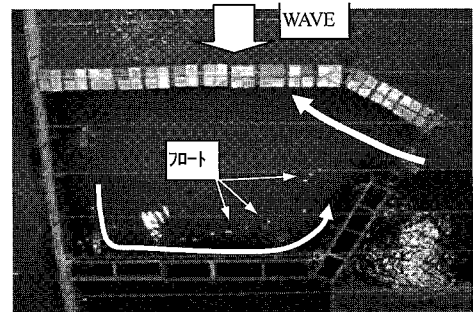


写真-1 流況の観測状況 (波除堤: 無, $T=1.4\text{s}$, $H=5\text{cm}$)

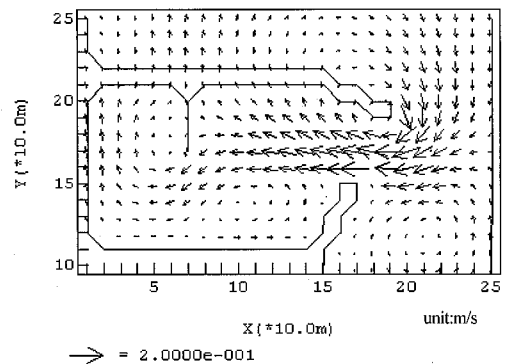


図-9 流況計算結果(波除堤: 有, $T=7.0\text{s}$, $H=1.3\text{m}$): 現地換算

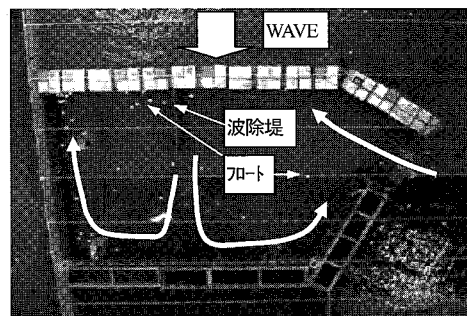


写真-2 流況の観測状況 (波除堤: 有, $T=1.4\text{s}$, $H=5\text{cm}$)

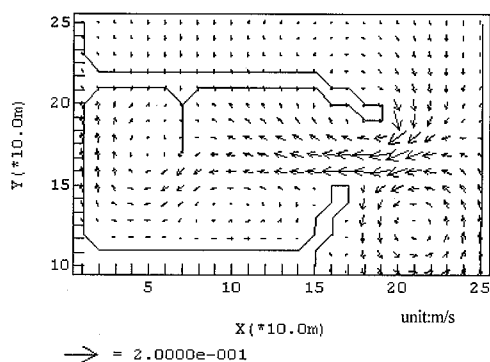


図-10 流況計算結果(波除堤：有, $T=6.0s$, $H=1.3m$)：現地換算

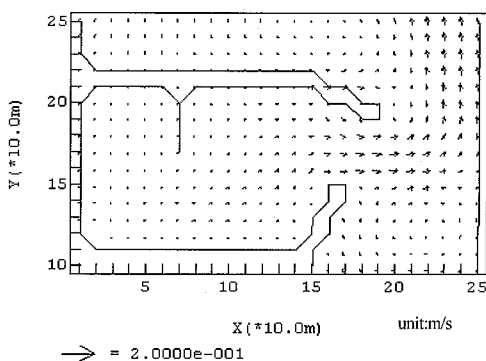


図-11 流況計算結果(縮尺 $S=1/25$)
(単一カーテン： $T=6.0s$, $H=1.3m$)：現地換算

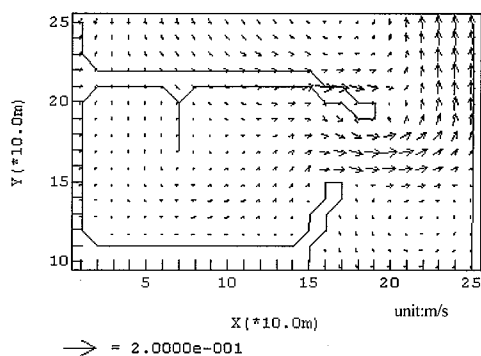


図-12 流況計算結果(縮尺 $S=1/25$)
(単一カーテン： $T=7.0s$, $H=1.3m$)：現地換算

おり、実際場での港内泊地は、概略的に長さ $130m \times$ 幅 $100m$ となる。これは、中規模程度の漁港に相当すると考えられ、その泊地の面積は $15000m^2$ 程度になる。

図-13は、港内の海水を全て交換するために必要な時間の現地換算量の推定結果について示す。推定では、平面実験より得られた防波堤の下部通水部の平均輸送流量とその総延長線から時間当たりの交換量を算出した後に、港内の全水塊量を対象にして必要交換時間を求めた。今回の実験では冲防波堤の全てが海水交換防波堤としたが、

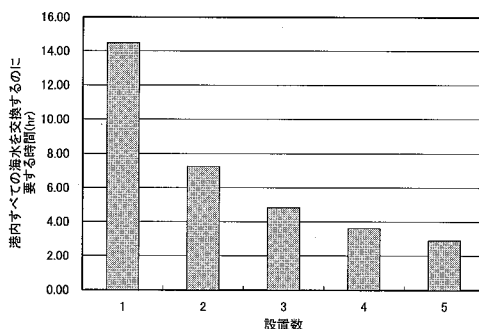


図-13 港内すべての海水を交換するための必要時間 ($T=6.0s$, $H=1.3m$ における流量より算定)

ここでは冲防波堤直線部の設置数(1ユニット長 $12.5m$)を変化させて検討した。このとき、防波堤1ユニット当たりの交換量は、波除堤有りで波周期が $6.0s$ の場合の海水交換量の結果を基にした算定した。この図より、当港程度の港であれば、湾内すべての汚濁水を一晚で交換するには、2ユニット程度(冲防波堤総延長： $190m$ に対して $25m$ 程度)設置すればよいことが確認できる。

7. 結 語

- (1) 湾奥の海水を効率よく交換するためには、波除堤を設置する方が良い。当モデル港湾のような港形では、港内中央部の濁度がたまる傾向にあるが、波除堤を設けると時間的に早く希釈される。これは、波除堤の設置により、港内の平均流のパターンが変わることによるものと考えられる。また、単一カーテン防波堤の場合、流れが沖→陸と傾斜版列防波堤とは反対方向になるものの、希釈時間については傾斜版列型の結果とほぼ同程度である。一方、不透過堤とした場合、やはり濁度の希釈には相当な時間を要する。
- (2) 傾斜版列型防波堤の平面波浪場における単位長さ当たりの海水交換量の推定には、断面二次元実験における海水交換量を用いて推定することが可能である。
- (3) 傾斜版列防波堤を外郭防波堤に設置した場合の、港湾内の流況特性については、マルチレベルモデル(1層)によりほぼ再現できる。この際、外力条件としては、傾斜版列防波堤部分での平均流の流速値を強制流として与えればよい。

参 考 文 献

- 藤原正幸・明田定満・武内智行(1992)：マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用，水産工学研究所技報，水産土木14号，pp.13-35。
 植本一徳・中村孝幸(2006)：傾斜版列を有する遊水室型海水交換防波堤の効果について，第53回海講論文集，pp.696-700。