

海水交換型防波堤の海水交換量の数値シミュレーション手法

有澤秀則*・下山敬次**・池淵哲朗***
下土居秀樹****・中本幸人*****

海水交換型防波堤の海水交換性能の数値シミュレーションにおいて、海水交換量を精度良く推定するためには、数値シミュレーションでの平均水位誤差を小さく抑えることが重要である。本研究ではまず、従来の造波理論解を応用して、シミュレーションでの造波境界と堤体間の距離を波浪条件に応じて適切に設定することで、平均水位誤差を抑える手法を提案した。本手法の有効性を確かめるため、衝立パネル式海水交換型防波堤の海水交換量推定に適用し、従来の実験結果との比較を行った。その結果、計算値と実験値が概ね一致し、本手法の有効性が確かめられた。

1. はじめに

海水交換型防波堤は、海水交換機能を有するため、海岸の自然環境に配慮した新しい防波堤として、今後の設置が増加すると期待されている。海水交換型防波堤の開発には、防波堤の近くにおける海水の流動を詳細に知る必要があり、このためには流れ場の可視化が行える数値シミュレーションが適している。数値シミュレーションの沿岸構造物への適用については、数値波動水路（沿岸開発技術センター、2001）をはじめ多くの研究が行われている。しかし、海水交換型防波堤の海水交換量のような、遊水部の平均水位と遊水部外の平均水位との差が重要となる量の推定に対しては、数値シミュレーションでの数値誤差による平均水位の上昇・低下の影響が障壁となり、海水交換性能の精度の良いシミュレーション手法は見あたらないうである。

平均水位に対する数値誤差を抑えるための1つの方法として、波浪が伝播する距離が長いほど数値誤差が大きくなることから、数値シミュレーションにおいて造波境界と堤体間の距離を短くすることが考えられる。一方、造波境界からの波反射が堤体位置での波高に影響するため、造波境界と堤体の距離はできるだけ長くとる必要がある。そのため、造波境界と堤体間の適切な距離の設定が重要となる。

そこで本研究では、波高変動を適切な値に設定することにより、造波境界と堤体間の距離を小さくし、平均水位の誤差も小さくすることができる手法を考案した。波高変動の推定には、高山ら（1976）の造波理論解による実験水路での波高変動推定手法を用いた。本手法の有効性を確かめるため、衝立パネル式海水交換型防波堤の海水交換性能推定に本手法を適用し、島田ら（1999）の実験結果との比較を行った。

2. 海水交換量の数値シミュレーション手法

（1）計算法

汎用流体解析コード FLOW-3D（Flow Science, Inc., 2000）を用いた。FLOW-3D は保存式として、3次元非圧縮の、連続式および Navier-Stokes 式を用いて、自由表面を有する流れ場を解析できるコードである。数値解法として SOLA-VOF 法・Donor-Acceptor 法（Hirt ら、1981）を用いている。また、数値造波手法として造波境界位置にてストークス第5次近似の速度分布と水位を与える手法を用いている。

（2）造波境界と堤体間の距離の設定法

a) 理論解析の適用性

高山ら（1976）は、ピストンタイプの造波板によって起こされる波の伝播現象を、振動している矩形タンク内に発生する波の線形理論の非定常解を用いた解析法を示した。本設定法では、数値シミュレーションにおける波高変動を、理論解析を用いてあらかじめ推定を行うことを基礎としている。そのためまず、波高変動について、数値シミュレーションと理論解析が一致しているかどうかの確認を行った。以下にその概略を示す。

・波浪条件

波周期 $T=3$ s, 波高 $H=0.5$ m, 水深 $h=16$ m, 水位時刻歴の解析位置を造波境界から 45 m 離れた位置とした。

・理論解析条件

解析時間を 50 s, 矩形タンク長さを 720 m, 造波板の振幅は波高が 0.5 m となるように設定した。

・数値計算条件

水路を 2 次元モデル、造波境界と堤体間の距離を 75 m とした。計算格子幅として、波の進行方向の格子幅を波長の約 1/50, 水面付近の上下方向の格子幅を入力波高の 1/12 とした。さらに、対流項の差分スキームを 1 次風上、壁面では free-slip 条件、乱流モデルなし、とした。

・水位時刻歴の比較結果

水位時刻歴について、理論解析結果と今回の数値シミュレーション結果を比較したものを図-1 に示す。

* 工修 川崎重工業(株)技術研究所
** 工修 川崎重工業(株)技術研究所
*** 工博 川崎重工業(株)技術研究所
**** 正会員 川崎重工業(株)鉄構ビジネスセンター
***** 川崎重工業(株)鉄構ビジネスセンター

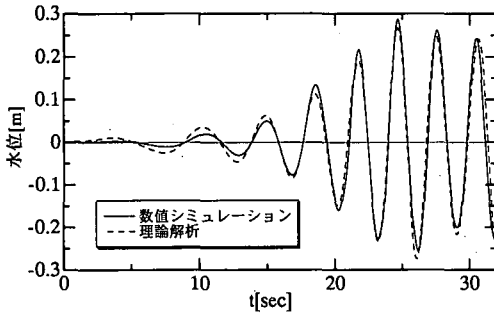


図-1 水位時刻歴の比較

図-1より、造波後20s以降は、理論解析結果と数値シミュレーション結果が良く一致することが分かった。20s以前では、今回の数値シミュレーションにおける波高が理論解析の波高よりも小さい結果となっている。この原因としては、本数値シミュレーションにおける水面付近の上下方向格子幅が入力波高に対して12メッシュであるため、波高が小さいときには、その波高をカバーする上下方向格子数が少なくなるからであると考えられる。

b) 造波境界と堤体間の距離の設定法

高山ら(1976)はさらに、理論解析結果から得られる波高分布図を用いて、模型実験における有効測定時間の算定方法を示した。この方法は実験水路のように造波機と堤体間の距離が一定である場合の算定方法であるが、本研究では逆に、波高解析時間と波高変動をあらかじめ設定し、そこから造波境界と堤体間の距離を求める手順を用いた。図-2にそのフローを示す。

以下に、具体的な設定方法を示す。まず、前節の波浪条件にて理論解析を実施した結果を図-3に示す。図-3は、造波機から30m~60m離れた位置での波高変動を無次元化したものであり、 T_r は無次元時間(定義を図-3横軸中に示す)、 g は重力加速度、 x は造波境界から波高解析位置までの距離、 t は造波開始後からの時間、 t_0 は波

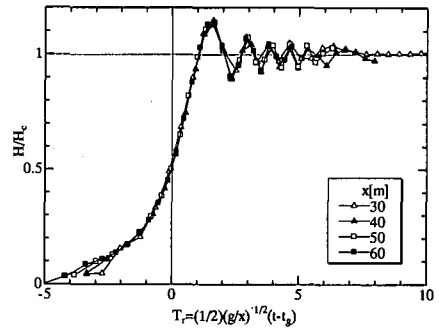


図-3 波高分布図

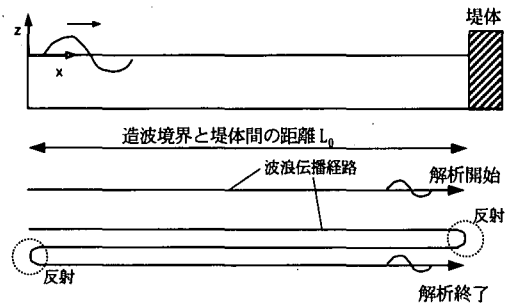


図-4 波高解析開始時刻・終了時刻

が波高解析位置に群速度 c_g で到達する時間であり、 $t_0 = x/c_g$ である。また、縦軸の H は各時間での波高、 H_c は波高が一定に達したときの波高を示す。

海水交換性能の解析開始時刻を、造波境界から造波された波が堤体位置に到達する時刻とし、解析終了時刻を、堤体から反射した波が造波境界で反射され、堤体位置に再び戻ってくる時刻とした。この模式図を図-4に示す。

図-3中の T_r の定義式に $t_0 = x/c_g$ を代入し、 t に関して整理すると、次式となる。

$$t = 2T_r \sqrt{\frac{x}{g}} + \frac{x}{c_g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

造波境界と堤体間の距離を L_0 とし、解析開始時刻 t_1 での T_r を T_r' 、解析終了時刻 t_2 での T_r を T_r'' とすると、 t_1 および t_2 は次式となる。

$$t_1 = 2T_r' \sqrt{\frac{L_0}{g}} + \frac{L_0}{c_g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$t_2 = 2T_r'' \sqrt{\frac{3L_0}{g}} + \frac{3L_0}{c_g} \quad \dots\dots\dots (3)$$

有効解析時間 t' は、 $t' = t_2 - t_1$ となる。ここで T_r' は造波された波が堤体に到達したときの無次元時間であり、例えば図-3にて $T_r' = 4$ とすると5%の波高変動となる。また、 T_r'' は堤体で反射した波が造波境界にて反射し、堤体へ再び入射するときの無次元時間であり、例えば図-3にて $T_r'' = -0.3$ 、堤体の反射率 $K_r = 0.5$ 、造波境界での

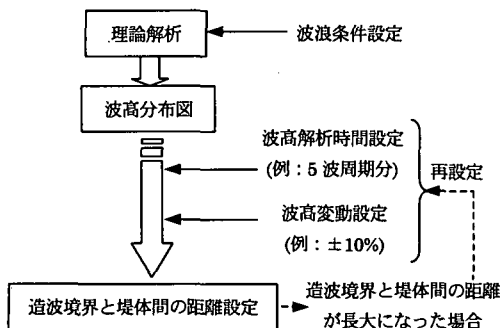


図-2 造波境界と堤体間の距離の設定フロー

反射率を1とすると $10\% \times K_r \times 1 = 5\%$ の波高変動となる。すなわち、波高解析位置での波高変動は $5\% + 5\% = 10\%$ となる。そこで、波高変動誤差を設定して T_r' , T_r'' を波高分布図から読みとり、さらに波高解析時間 t' を設定して、式(2)(3)より造波境界と堤体間の距離 L_0 を求める (g, c_0 を既知の値とする)。波高解析開始時刻 t_1 、および終了時刻 t_2 はそれぞれ式(2)、(3)から求めることができる。

3. 衝立パネル式海水交換型防波堤の水理模型実験結果

図-5 は、島田ら (1999) が実施した、衝立パネル式海水交換型防波堤の海水交換量の実験結果を示すものである。図-5 中の数値は実機換算されたものであり、横軸は波周期、縦軸は単位堤体長さでの1時間当たりの導水量である。遊水部から港内側への導水には、直径 100 mm (模型スケール) の導水管を堤体長さ方向に 250 mm 間隔で用いている。実験パラメータとしては、凡例に示すように衝立パネル上端と水面の距離をとっている。

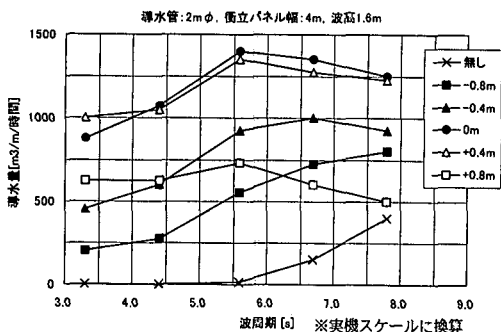


図-5 衝立パネル式防波堤の単位堤体長さ・1時間当たりの導水量実験結果 (島田ら, 1999)

図-5 より、パネル高さを平均水面に一致させたときもしくは $+0.4$ m とした場合に、導水量が最大となることがわかる。

4. 海水交換量の数値シミュレーション

本章では、2章で示した手法を用いて海水交換量のシミュレーションを行い、3章で示した実験結果との比較を行うことにより、本手法の有効性を確かめる。

(1) 計算条件

a) 計算モデル

模型スケールの2次元モデルとした。図-6 に、計算モデルを示す。

衝立パネルや堤体・堰の相対位置や形状については、島田ら (1999) と同一とした。また、水深 h を 0.6 m、波高 H を 0.08 m とし、波周期 T を 0.75 s, 1.0 s, 1.25 s,

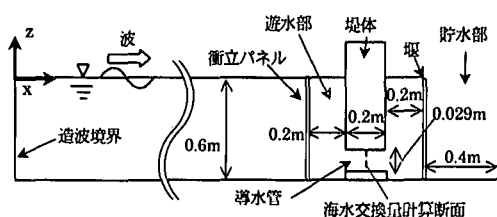


図-6 計算モデル

1.5 s, 1.75 s とした。導水管については、2次元モデルで計算を行うため、単位堤体長さ当たりの開口面積が等しくなるよう、 0.029 m の開口高さとした。また、開口部中心高さを導水管高さと同じとした。

造波境界と堤体間の距離、および海水交換量計算開始時刻・終了時刻については、波高変動を $10\% \sim 15\%$ と設定し、また、海水交換量計算時間を5波周期分、堤体と造波境界での反射率を1として、2章に示した手順を用いて設定を行った。その結果を表-1に示す。

表-1 造波境界と堤体間の距離、海水交換量計算開始時刻・終了時刻、波高変動設定値

波周期	造波境界・堤体間距離	開始時刻	終了時刻	波高変動設定値
0.75 s	6.54 m (波高の 7.0 倍)	20.23 s	24.21 s	15%
1.0 s	11.55 m (波高の 7.3 倍)	26.09 s	31.11 s	11%
1.25 s	17.26 m (波高の 7.5 倍)	30.18 s	36.89 s	10%
1.5 s	20.00 m (波高の 6.7 倍)	28.66 s	36.84 a	15%
1.75 s	28.20 m (波高の 7.6 倍)	37.62 s	46.52 s	13%

b) 計算格子

計算格子の一例を図-7に示す。水平方向の格子サイズは、造波境界から衝立パネル前方までの波浪伝播領域については、波長 L の $1/50$ を基準とした。また、遊水部から堰までは格子密度を波浪伝播域の 1.5 倍とした。

鉛直方向の格子サイズは、平均水面から上下両方共、波高 H の高さまで波高 H の $1/10$ を基準とした。上下両方共に波高 H まで細かいメッシュとしたのは、堤体の反射率が1に近い場合には、波高が2倍近くになることを想定したものである。また、堤体部のスリットでの鉛直方向メッシュを5メッシュとした。その他の部分の上下方向格子サイズは、格子の拡大比が2を越えない範囲で設定した。

c) その他の計算条件

造波境界位置にてストークス第5次近似の速度分布と水位を与えた。また、対流項の差分スキームを1次風上とした。1次風上スキームを用いると、数値粘性が大きくなると考えられる。そのため、乱流モデルなしとした。壁面条件に関しては、壁面付近の格子幅が壁面での境界層

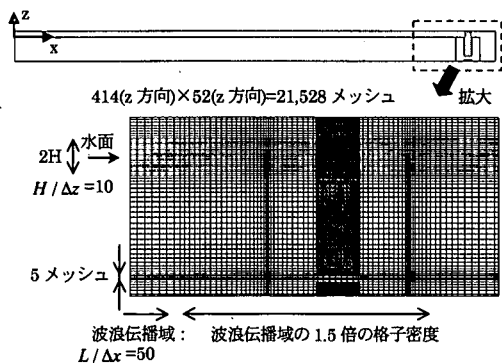


図-7 計算格子の例 (波周期 1.0 s の場合)

厚さに比べて粗いことから、壁面では free-slip 条件とした。

(2) 計算結果

a) 堤体に入射する波の波高の検定と、海水交換量に対する波高変化の影響の補正法

各波周期にて、衝立パネルおよび堤体を取り去り、堰・貯水部の代わりに格子間隔を粗くし、自由流出とした減衰領域を接続して、堤体位置での波高の検定を行った。その結果を表-2に示す。表-2より、短周期側での波高が減少し、長周期側での波高が増加していることがわかる。そのため、海水交換量の計算結果に対して、波高変化の影響の補正を行う。

表-2 入射波高の検定

波周期	波高	波高/入力波高 (波高変化率)
0.75 s	0.0455 m	56.9%
1.0 s	0.0665 m	83.1%
1.25 s	0.0688 m	86.0%
1.5 s	0.0854 m	106.8%
1.75 s	0.0876 m	109.5%

衝立パネル式防波堤の導水量は、島田ら (1999) が示したように、静止水面を乗り越える入射波の面積を無次元化パラメータとすることができる。本計算では、その無次元化パラメータが波高に比例することを用いて、海水交換量の計算結果を表-2の波高変化率で除したものを補正值とした。

b) 流れ場の様子

図-8に、波周期 1.0 s の場合の、1 周期分の流れ場の様子を示す。また、図-9に、海水交換量 (導水管を通る流量) の時刻歴の例を示す。図-8の $t=29.8$ s で衝立パネル前面の波高が上昇したときに遊水部への流入が発生するのに対して、 $t=29.2$ s で衝立パネル前面の水位が下降しているにもかかわらず遊水部からの流出は抑えられていることがわかる。このことから、遊水部での平均水位は港内側の平均水位よりも高くなり、その差が海水交換量として、図-9の海水交換量の時刻歴で示される流

量が、導水管から流出することとなる。これらは島田ら (1999) の考察と一致するが、本シミュレーションではさらに、 $t=29.4$ s において遊水部からの流出が見られ、遊水部の平均水位増加量すべてが導水量となっていないことが分かる。このことから、導水管の圧力損失を下げるにより、導水量を増加させることができると考えられる。

c) 海水交換量

海水交換量を、表-1に示す海水交換量計算開始時刻から終了時刻までの海水交換量の時刻歴を平均化して求め、衝立パネルの高さごとに整理したものを図-10に示す。図-10での数値はすべて実機換算され、本節の a) で示した波高変化の影響の補正を行った値である。また、貯水部への流出を考慮した水量誤差の時刻歴の例を図-11に示す。図-11より、海水交換量計算時間での水量誤差がマイナス 0.5% 程度でありほぼ水位一定であることがわかる。

図-10より、パネル高さを平均水面に一致させたとき、もしくは +0.4 m とした場合、導水量が最大となる

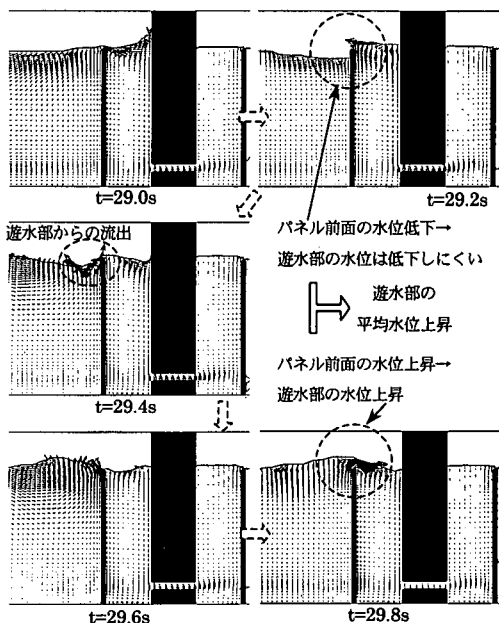
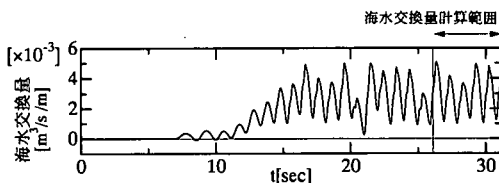
図-8 流れ場の様子 ($T=1.0$ s, パネル高さ = 平均水面)

図-9 海水交換量 (導水管を通る流量) の時刻歴

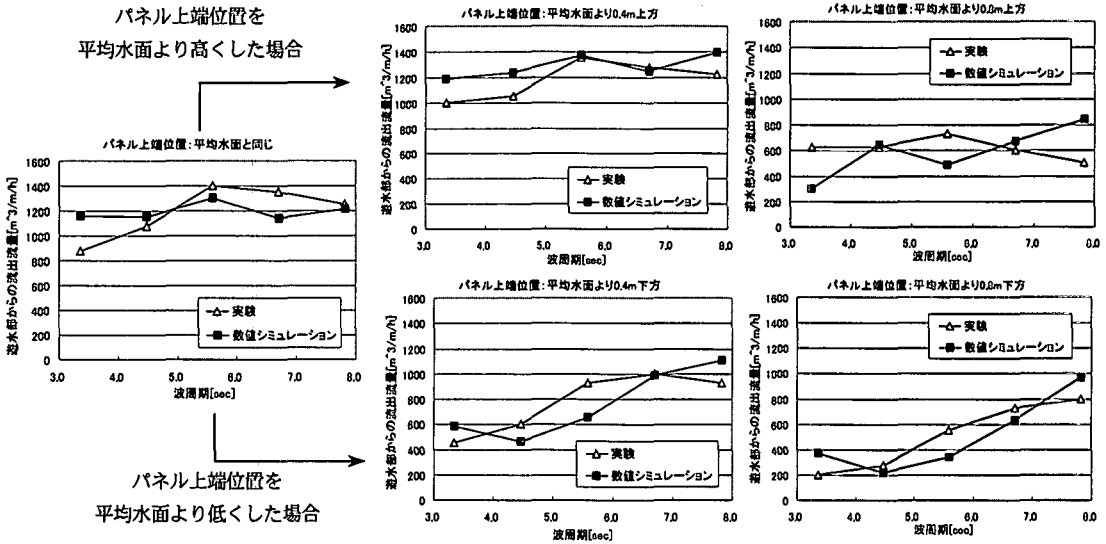


図-10 海水交換量のシミュレーション結果

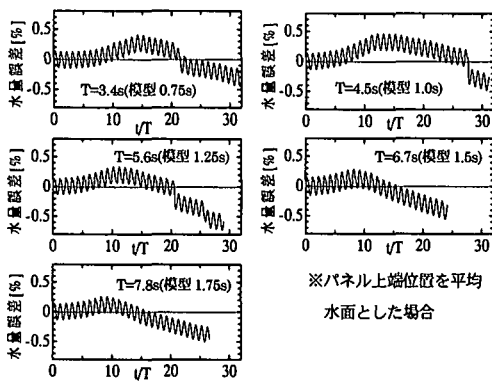


図-11 水量の誤差の例

定に適用し、従来の実験結果との比較を行った。その結果、平均水位の数値誤差をマイナス 0.5% 程度に抑えることができ、海水交換量において計算値と実験値が概ね一致した。このことから、本手法により、衝立パネル式海水交換型防波堤の海水交換量の概略値を推定できることが分かった。本計算手法は、防波堤の越波流量のように、平均水位に対する数値誤差を小さくすることが求められる物理量の推定に対しても有効であると考えている。また、本計算コードは、3次元のコードであるため、縦スリットを持つケーソンのように、スリットが3次元形状を持つために3次元計算が有効であるシミュレーションにおいても対応が可能である。

参考文献

- 沿岸開発研究センター(2001): 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12.
- 島田 潔・松原直哉・吉村 正・神瀬 哲 (1999): 衝立パネル式ケーソンの海水交換特性に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 433-437.
- 高山知司・神山 豊 (1976): 実験水路における波の伝播について, 第23回海講論文集, pp. 381-385.
- C.W. Hirt and B.D. Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comp. Phys, 39, 201.
- Flow Science, Inc. (2000): FLOW-3D User's Manual Ver. 7.7.

5. おわりに

海水交換型防波堤の海水交換量を推定するために、まず、平均水位に対する数値誤差を抑えることを目的として、従来の造波理論解を応用した、造波境界と堤体間の距離を波浪条件に応じて設定する手法を提案した。次に、本手法を衝立パネル式海水交換型防波堤の海水交換量推