

直立消波堤に作用する波圧算定への数値波動水路の適用性検討

Application of the Numerical Wave Flume to the Analysis of Wave Pressures upon Wave Absorbing Caisson

小竹康夫¹・小淵康義²・高橋重雄³

Yasuo KOTAKE, Yasuyoshi OBUCHI and Shigeo TAKAHASHI

Recently, several types of numerical wave flume to simulate the non-linear wave transformation have been developed. In this study, the applicability of CADMAS-SURF which is one of them for calculating the wave pressures upon wave absorbing caisson is discussed. The structure is identified by the slit wall and wave chamber, and it is important to set the values of inertia coefficient, resistance coefficient and permeability coefficient when modeling the slit wall as porous body. Then, the sensitive analysis on those parameters, and the calculation of the wave pressures upon the structure with CADMAS-SURF was conducted. And it is shown that the calculation results have a good agreement with the experimental results in equivalent sliding wave force acting against the wave absorbing caisson.

1. はじめに

数値解析技術の進歩に伴い、水理模型実験や経験式に代替し得る解析手法として、非線形波浪変形を扱う数値波動水路の開発が進められている。例えば、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)では、2次元非圧縮粘性流体を対象に、自由表面の解析にVOF法を採用した数値波動水路CADMAS-SURF(Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure)を開発し、各種の構造物形式を対象とした検討をしている。また後藤ら(2005)は、計算格子の制約を受けず、現象の3次元性を的確に表現する方法として、粒子法を用いた数値波動水槽を開発し、碎波現象に内在する3次元性を示している。数値波動水路は、水理模型実験では測定が困難な現象の把握に役立つと考えられるが、複雑な形状の構造物に作用する波力の算定結果を設計に用いるには、計算結果が構造形式の特性を適切に再現しているかを検証しておく必要がある。

本研究は、直立消波堤を対象に、CADMAS-SURFによる波力特性の再現性の確認を目的としている。直立消波堤は、一般に直立壁前面に透過壁と遊水室をもつ特殊な構造からなり、透過壁による流れの急縮と急拡を利用して乱れを発生させることで、反射率を低減する構造物である。すなわち、透過壁および遊水室で発生する乱れが特徴的な構造物であり、透過壁のモデル化が重要となる。本研究では、スリット形式の開口部を有する透過壁(スリット壁)を対象に、汎用的なモデル化の手法と

して、多孔質体(ポーラスメディア)として取り扱う。そしてまず、多孔質体の設定に必要なパラメタの値について、一様管路流およびダム破壊のモデル計算により考察する。つづいて、水理模型実験の再現計算を行い、CADMAS-SURFでスリット壁を多孔質体としてモデル化する手法の適用性について検討する。

2. 透過壁(スリット壁)のモデル化

(1) CADMAS-SURFの概要

CADMAS-SURFの基礎式は式(1)の連続式および、神山ら(1990)がNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式(2)、式(3)の運動方程式から構成される。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 t : 時間、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分、 ρ : 密度、 p : 圧力、 ν_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g : 重力加速度、 γ : 空隙率、 γ_x, γ_z : 水平、鉛直の面積透過率であり、 C_M を慣性力係数として、 $\lambda_v = \gamma + (1 - \gamma) C_M$, $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$, $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M$, R_x と R_z は多孔質体からの抵抗力であり、水平方向を例として式(4)に示すとおり、流速の2乗に比例する形でモデル化されている。

1 正会員 博(工) 東洋建設(株) 鳴尾研究所 主任研究員
2 正会員 東京電力(株) 技術開発研究所 設備基盤技術グループ 主管研究員
3 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 研究主監

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに C_D は抵抗係数, Δx は水平方向の格子間隔である.

(2) 空間格子によるスリット壁形状のモデル化

CADMAS-SURF でスリット壁をモデル化する場合, 水平スリット形式の透過壁の断面形状を, 空間格子で再現することができる. 折橋ら (2005) はこの手法で, 水平スリットを有する鉛直平板を対象に, 実験と数値計算による可視化を行い, スリット周辺の流速および乱れエネルギーの空間分布について調べた結果, 周期の短い波浪に対しては, 両者の一致度は良好であるが, 周期が長くなると差が大きくなることを指摘している. また小竹ら (2001) は, 直立消波堤の反射率を適切に算定できることを示している. ただしこの手法では, 鉛直スリット形式の透過壁がモデル化できないほか, 空間格子を小さく設定する必要があるために計算時間が膨大となり, 場合によっては実用的でないなどの課題がある.

(3) 多孔質体としてのスリット壁のモデル化

水平, 鉛直のいずれのスリット形式にも対応する手法として, 多孔質体 (ポーラスメディア) としてのモデル化がある. この手法では, 多孔質体の γ および C_M , C_D の3つのパラメタを設定する必要がある. 「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001) では, 多孔質体として $C_M=1.2$, $C_D=1.0$ および, 後述の縮流係数を考慮したスリット壁の実質開口比 ϵ' を γ に代入した場合の反射率算定を試み, 妥当な結果を与えるものの, パラメタの設定には更に詳細な検討が必要と指摘している.

一方, スリット壁など連続する柱状体の理論的検討として, 例えば谷本・吉本 (1982) は, 直立消波堤の反射率を最小とする最適構造諸元を算定するための検討をしている. ここではスリット壁に作用する波力にモリソン式を適用し, 透過壁内の平均的な流速およびその時間変化に対応する有効慣性長, および損失係数を導入している. ここで有効慣性長とは, 検査領域内の流体が持つ運動量の時間変化による慣性力と, それと同位相でスリット部材に働く慣性力の反作用として流体がスリット壁から受ける慣性力の和に等しい力を, スリット部材などの流体の運動を妨げるものが何もないとしたときに流体が持つために必要な長さとして解説されている. そして実験結果をもとに, 各パラメタ値の算定図表を提案している.

ここで CADMAS-SRUF で用いる各パラメタについて整理する. まず γ は, スリット壁の開口比 ϵ に相当する. 小竹ら (2001) は, 空間格子によるモデル化に際して, 格子数が不十分で, 図-1 に示す縮流現象の再現が困難な場合に, その効果を便宜的に与える係数として縮流係数 C_c を用いた実質開口比 $\epsilon' = C_c \epsilon$ を γ に代入する

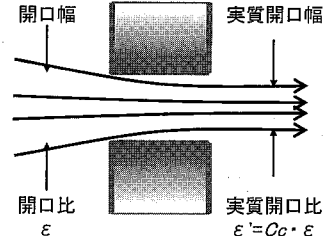


図-1 縮流効果の概念図

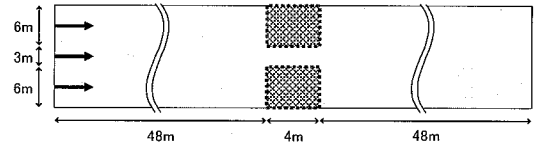


図-2 一様管路流解析モデル

手法を導入している. 多孔質体でモデル化する場合も, 縮流による流速変化などを考慮するうえで, この手法を採用することが出来る.

次に C_D について, 榊山ら (1990) は, 抵抗が有限要素に占める個体に作用するせん断応力に比例すること, 抵抗が有限要素に均一に分布することをモデル化して抵抗力を定式化している. そのため, スリット部材厚を水平方向1格子で設定すれば, 谷本・吉本 (1982) の損失係数から算定される値を用いることが可能である. また同様の考え方に従って, C_M はスリット部材厚で無次元化した有効慣性長から算定することが可能である.

すなわち, 多孔質体のパラメタ設定には, 谷本・吉本 (1982) の算定図表が利用可能と考えられ, 「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001) で用いた値は, 算定図表に実験値のばらつきを考慮した値の範囲内に存在している. ただし, これらのパラメタ値は, 構造物の諸元により異なることに注意が必要である.

(4) 一様管路流による縮流効果の検討

多孔質体としてスリット壁をモデル化した場合, 透過壁全体に均質な流れを仮定するため, 縮流現象による流速を再現することができない. そこで小竹ら (2001) の用いた実質開口幅の概念を導入し, 縮流係数 C_c について, 一様管路流解析モデルを用いて検討を行った.

解析モデルの概要を図-2に示す. 図に示すとおり高さ3mの開口部を1箇所のみ有する幅4mのスリット壁を, 高さ15m, 長さ100mの管路中央に設置し, 左端から流速1.0 m/sの一様流を発生させた. 解析では表-1に示す空間格子を用いて開口部の流速を算定した. このうち空間格子の一番小さい $\Delta x=0.25$ m, $\Delta z=0.25$ mのケースを可視化した結果を図-3に示す. また, いくつかの空間格子について開口部での流速分布を図-4(a)~(d)に示す. 図-4(a)は, 開口部を1セルで表現し

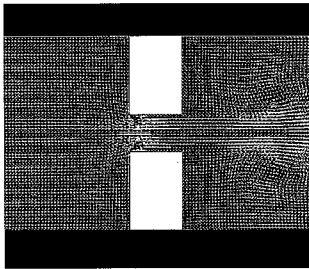


図-3 開口部での流れの可視化

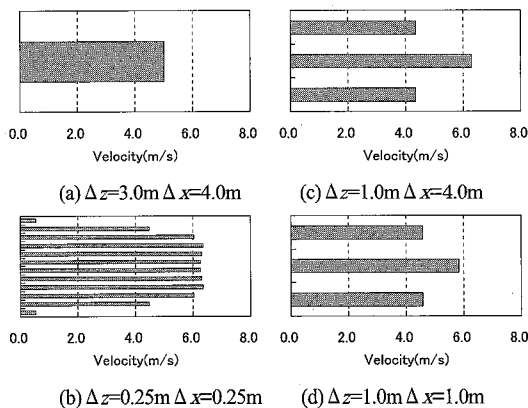


図-4 開口部での流速分布

表-1 一様管路流解析のケース一覧

Δz (m)	Δx (m)
3.0	4.0
1.5	2.0
1.0	1.0・2.0・4.0
0.5	0.5・1.0・2.0
0.25	0.25

た場合で、領域左端からの一様な流入量に相当する流速 5 m/s が算定されている。図-4(b)は図-3に示した開口部を鉛直 12 セル、水平 16 セルに分割した場合で、開口部中央付近ではほぼ一様な流速となり、壁面境界に向けて小さくなる分布を示している。また、図-4(c)(d)は開口部を鉛直 3 セルに分割し、水平には各々 1 セルと 4 セルに分割した結果である。水平方向の分割数が多い図-4(d)では、中央部と境界部の流速の差が小さく、鉛直分割数の異なる $\Delta z=0.5$ m のケースでもこの傾向は同様である。これらより、開口部を表現する格子数により、通過流速やその分布が異なることが確認できる。ここで、解像度の一番高い図-4(b)を用いて縮流係数 C_c について考察する。このケースでは、鉛直方向 12 セルのうちで、中央部分の 8 セルが約 6.0 m/s の均一な流速分布を示し、この値は、開口幅を 8/12 倍に縮小し、開口部を 1 セルで表現した場合の流速に相当する。これ

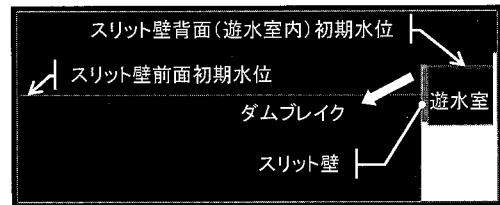


図-5 ダム破壊解析モデル

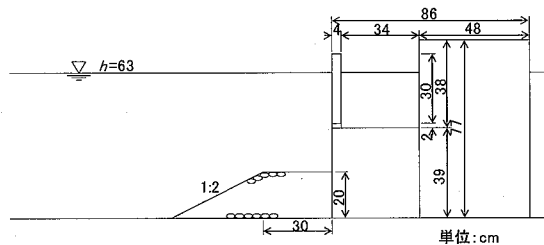


図-6 直立消波堤断面図

を縮流の影響と考えれば、 $C_c=0.6 \sim 0.7$ 程度が妥当な値と判断される。また小竹ら(2001)は、 $C_c=0.6$ とした場合に直立消波堤の反射率の実験結果を精度良く再現することを確認しており、今回の検討結果と整合している。

このことから、多孔質体でスリット壁をモデル化する際に空隙率 γ に代入する実質開口比 ϵ' を、実際のスリット開口比 ϵ から換算する縮流係数は $C_c=0.6$ が適当である。

(5) ダム破壊モデルによるパラメタの影響評価

多孔質体を透過する流体運動を規定し、波圧の時間変動特性に影響するパラメタとして、慣性力係数や抵抗係数および空隙率の感度分析を目的としたダム破壊モデルにより、スリット壁前面水位 (SlitF) および背面水位 (SlitR) の変化に要する時間について検討した。図-5にモデル概要を示す通り、直立消波堤を模擬したスリット壁と遊水室を設置し、遊水室の初期水位をスリット壁天端高さに設定して、遊水室からスリット壁を通じて左側の領域に水が自然流出する状況を再現し、遊水室内の水位低下および構造物前面との水位差解消に要する時間を算定した。構造物の諸元は、水理模型実験の再現計算を念頭に、図-6に示す高橋ら(1991)の堤体断面を用いた。計算格子は、水平方向 $\Delta x=1$ cm、鉛直方向 $\Delta z=1$ cm とした。

まず図-7は、空隙率を変化させた場合の結果で、慣性力係数 $C_M=1.2$ 、抵抗係数 $C_D=1.0$ である。横軸は空隙率、縦軸には、遊水室内水位が前面初期水位に一致するまでの時間 (SlitR=0) および、遊水室内水位と前面水位が一致するまでの時間 (SlitR-SlitF=0) を、スリット壁がない場合の所要時間で無次元化した水位低下時間を示す。空隙率 1.0 は、スリット壁が無い場合に相

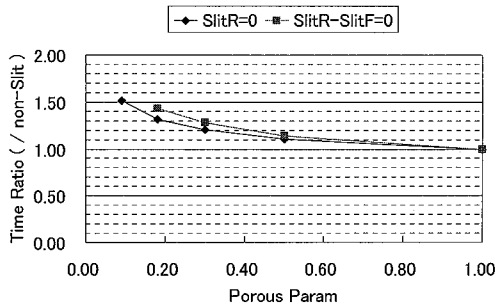


図-7 空隙率による水位低下に要する時間の変化

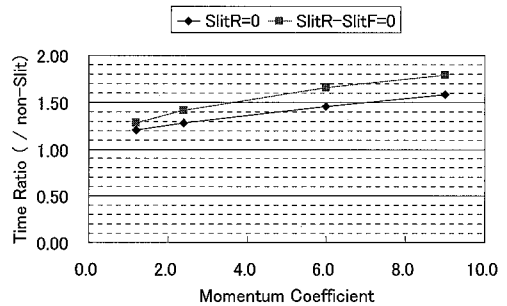


図-8 慣性力係数による水位低下に要する時間の変化

当する。この結果、いずれの曲線とも空隙率が大きいほど所要時間が短くなる傾向を示すが、変化の割合は、空隙率が小さい場合に大きいことが分かる。なお、直立消波堤のスリット開口比は、一般的には0.15～0.4程度を採用することが多いが、この図から、水位差を生じ易い範囲に空隙率を設定していることが分かる。

次に慣性力係数について、榊山・香山(1997)は、碎波を伴う消波護岸での越波量を算定するにあたり、実験スケールの影響も考慮した消波ブロックの慣性力係数として $C_M=1.2$ を提案している。また、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)では、 $C_M=0.8\sim 1.2$ に変化させた直立消波堤の反射率計算を行い、 $C_M=1.2$ の場合に実験値に近い結果を得ている。そこで $C_M\geq 1.2$ の範囲で慣性力係数を変化させ、空隙率の場合と同様の比較をした。結果を図-8に示す。ここでは $C_D=1.0$ 、 $\gamma=0.18$ とした。この図より、 $C_M\geq 1.2$ では $\text{SlitR}=0$ と $\text{SlitR-SlitF}=0$ のいずれも、慣性力係数が大きくなるほど単調に所要時間が長くなることが分かる。

最後に、抵抗係数を $C_D=1.0$ および5.0に設定した2ケースについて、 $C_M=1.2$ 、 $\gamma=0.18$ として同様の比較を行ったが、所要時間に差は無かった。今回のダム破壊モデルでは、水位差に起因する自然流出を再現したために流速が小さく、運動方程式中の C_D に依存する抗力項の影響が極めて小さかったためと考えることが出来る。

3. 直立消波堤に作用する波力計算

これまで簡易なモデルを用いて、各パラメタの特性を

検討してきたが、直立消波堤を対象とした数値計算を行う上で、パラメタの値を設定する必要がある。そこで「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」(2001)で示された値を基準に各パラメタの値を変化させて、波力特性の再現性について検討する。

(1) パラメタの設定

空隙率については、空間格子を細かくすることにより、水平スリット形式での縮流効果を数値計算上で再現することの可能性を示したが、格子数に依存して計算時間が増大することから、細かな空間格子での計算は実用的でない。また理論検討との整合性も考慮し、スリット部材厚を水平方向1セルで表現することを前提として、一樣管路流の検討から得られた縮流係数 $C_c=0.6$ を用いて、実質開口比 $\epsilon'=0.6\epsilon$ を空隙率 γ に代入するものとした。

慣性力係数については、 $C_M=1.2$ に比べて計算上で水位差を生じやすい条件として、 $C_M=1.7$ 、5.0を用いた。また慣性力係数に比べて抵抗係数の影響は小さいと推定され、 $C_D=1.0$ 、2.4について検討した。

(2) 部材波力の算定

解析モデルの全体図を図-9に示す。空間格子は、水平方向にはスリット部材厚に等しい $\Delta x=0.04\text{ m}$ 、鉛直方向には $\Delta z=0.01$ とした。対象波浪は周期2.0秒の規則波で、構造物位置での通過波高は、高橋ら(1991)の10 cm、20 cm、30 cmを目標に、波浪検定から10.0 cm、20.5 cmおよび28.3 cmとした。造波には造波ソースとその沖側に設置したエネルギーの減衰帯の組合せで再反射を防止した。

直立消波堤の断面は図-6に示す通りで、スリット壁

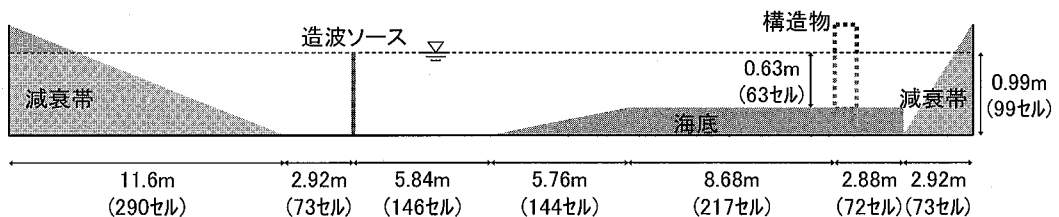


図-9 直立消波ケースン解析モデル

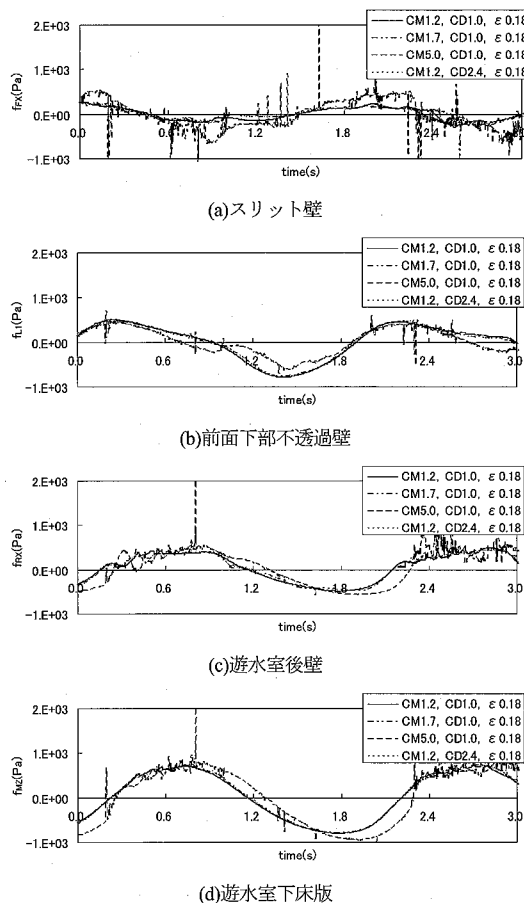


図-10 各部材に作用する波力の時間変化

は開口比 $\varepsilon=0.3$ の鉛直スリット構造である。計算結果の一例を図-10(a)～(d)に示す。これらの図は、波高 28.3 cm の場合の、スリット壁、スリット壁下部の直立部および遊水室背後の直立部に働く水平波圧合力と、遊水室下床版に働く鉛直波圧合力の時間変化を示したもので、水平方向は波の進行方向、鉛直方向は下向きが正である。多孔質体のパラメタ値は図の凡例に示した。パラメタ値の異なるケースのうち、 $C_M=5.0$ の場合のみノイズ的波形を多く含み、他のケースと傾向が異なる。これは、多孔質体でモデル化したスリット壁の前後で、他のケースに比べて大きな水位差が生じ、それが一度に部材に作用した場合に衝撃的な力を算定しているものと推測されるが、詳細については未検討である。ただし、それ以外のケースでは、部材ごとに最大値発生有位相が異なる。直立消波堤の波圧の作用特性を適切に表現している。そこで $C_M=1.2$ 、 $C_D=1.0$ の結果を用いて、各部材の波圧合力から水平および鉛直方向の波圧合力 F_H 、 F_V を求め、摩擦係数 $\mu=0.6$ として滑動合成波力 $F_{CCAL}=F_H+\mu F_V$ を算定し、高橋ら (1991) の実験結果 F_{CEXP}

表-2 計算結果と実験結果の比較

目標波高 (cm)	F_{CCAL}/F_{CEXP}
10.0	0.78
20.0	1.18
30.0	1.00

と比較した。結果を表-2に示す。計算と実験では波高が若干異なるため、波高に比例して換算した。この結果から、目標波高 10 cm に対して、計算値は実験値より小さく、これは波高に対して空間格子がやや大きいことの影響と考えられる。一方 20 cm では過大評価となっているが、最大波高の 30 cm に対して、今回の条件では極めて良好に一致している。このことから、直立消波堤の波力算定に有効な手段であることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、CADMAS-SURF の直立消波堤への作用波力算定への適用性を確認することを目的に、スリット壁を多孔質体としてモデル化する手法について検討した。その結果、波圧の時間変動を適切に表現し、波圧合力の再現性も良好であることから、本手法が直立消波堤の波力算定に有効な手段であることを確認した。今後は、その他の条件による実験結果との比較検証など最適なパラメタ値選定に向けて、更に詳細な検討を行う必要がある。

なお、本研究は「数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会」の活動の一環として実施しており、ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 折橋恒春・加島寛章・森 信人・角野昇八(2005): 波動場における水平スリット周辺の流況の可視化と数値波動水路の適用性, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 706-710.
- 小竹康夫・松村章子・藤原隆一・高橋重雄・磯部雅彦(2001): 直立消波ケーソン堤の反射率算定に対する VOF 法の適用性, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 1016-1020.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎(2005): 粒子法による三次元数値波動水槽の開発, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 26-30.
- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海工論文集, 第 37 巻, pp. 554-558.
- 榊山 勉・香山真祐(1997): 海底斜面上で碎波を伴う消波護岸への越波の数値計算, 海工論文集, 第 44 巻, pp. 741-745.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会(2001): 数値波動水路の研究開発, (財)沿岸開発技術研究センター, 296p.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均(1991): 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港研報告, 第 30 巻, 第 4 号, pp. 3-34.
- 谷本勝利・吉本靖俊(1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港研報告, 第 21 巻, 第 3 号, pp. 43-76.