

研究展望

海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF)の研究・開発とその将来展望

DEVELOPMENT AND PROSPECTS OF NUMERICAL WAVE FLUME : CADMAS-SURF
(SUPER ROLLER FLUME FOR COMPUTER AIDED DESIGN OF MARITIME STRUCTURE)

数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会¹

Research group on application of numerical wave flume to maritime structure design

¹ 事務局 (財) 沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-6 住友半蔵門ビル 6F)

Key Words: *design of maritime structures, numerical wave flume, CADMAS-SURF, VOF method*

数値計算を海域施設の耐波設計の実務に適用するためには、多様な造波機能や無反射境界を持ち、砕波・越波なども含め幅広い条件に対する波浪変形を精度よく再現でき、しかも扱いやすい数値モデルを開発する必要がある。そこで、様々な研究機関の研究者による共同研究会を組織し、その条件を満たす数値モデル CADMAS-SURFを開発した。本論文では、CADMAS-SURFの設計思想や機能、開発成果などについて解説し、その将来展望について述べる。

1. はじめに

(1) 耐波設計と数値計算

海域施設の設計においては、その機能や耐波安定性を精度良く算定することが不可欠である。現在は、主として水理模型実験か、それに基づく設計公式を用いているが、設計公式には精度の問題があり、水理模型実験は多くの費用と時間が必要である。また、21世紀の新しい設計法として注目されている性能設計などでは、さらに多くの情報を必要とする高度な設計が求められている。

我が国で海域施設の設計に関連して数値計算が実用的に用いられるようになったのは、計算機発展の初期である1950年代後半からであり、伊勢湾台風の後に行われた高潮計算¹⁾が最初と考えられる。その後、緩勾配方程式などの線形波動方程式による波浪変形計算が可能となり、現在では非線形の効果をも十分考慮した数値計算が行えるようになってきている^{2),3)}。ただし、これらは主として平面二次元の計算であり、砕波時に生じる巻き込みによる水塊の離脱や、乱れを含めた複雑な流れを表現するのが困難であるために、構造物の機能や安定性(耐波設計)について、直接計算することは容易ではない。そのため、現状では、耐波設計において数値計算が直接使われることはほとんどない。

一方、CFD(Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学)の手法が海岸・港湾工学の分野でも検討されるようになってきている。CFDは適切なモデル化のもとで

作成された流体の基礎方程式を数値的に解くことにより流体運動の特性を解明しようという考えであり、その技術を使えば構造物周辺の複雑な流れの場を解くことが可能になる。近年のCFDの発展は著しいものがあり、この研究成果をさらに発展させていけば、近い将来、耐波設計に数値計算を活用することが現実のものになると予測される。

近年ヨーロッパでは、こうした数値計算を海域施設の設計に適用する研究がかなり進んでおり⁴⁾、我が国でも次第に研究が進展している。特に最近では、非線形性の強い現象にも適用性が高く、かつ実用的な自由表面の処理方法としてVOF (Volume Of Fluid) 法^{4),5)}と呼ばれる方法が広く使われている。

本報告では、数値波動水路の活用・実用化に向けて、「数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会」で開発した数値波動水路の現状について紹介する。開発した数値波動水路はVOF法に基づく計算手法であり、波動場のみならず、波・流れ・地盤の相互作用を伴う現象の数値シミュレーションも迅速かつ容易に行うことができる。すなわち、数値波動水路は従来の断面二次元造波水路の水理模型実験に代わり得る手法であり、海域施設の耐波設計に適用できるものである。

(2) 共同研究会

研究会は、海域施設の耐波設計の実務に適用できる数値波動水路を作成することを目的としている。研究会(委員長:磯部雅彦 東大教授)は、事務局を(財)

沿岸開発技術研究センターにおき、大学や研究機関の研究者からなる専門委員と会員企業の委員で構成されている。研究会は平成10年4月に設立され、平成13年6月までの3年余にわたり、15回の作業部会と5回の委員会を開き、以下の2つの開発研究を行った。

①基本プログラムの開発

パソコンによって計算できる2次元の数値水路を開発した。まず、改良や拡張がしやすいよう、読みやすく整理された基本プログラム(FORTRAN)を作成し、造波境界、自由表面、無反射境界等について、十分な検討を加え、安定性の高い計算法を構築した^{6)~8)}。この数値水路を、数値波動水路CADMAS-SURF(SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of MARitime Structure)と呼ぶ。CADMAS-SURFは、海域施設の機能や安定性を検討することを目的としており、自由表面や碎波の影響を十分考慮できるものである。

②耐波設計への適用に関する研究

数値波動水路を種々の耐波設計に適用することを試み、その場合の問題点を明らかにするとともに、問題点の解決をはかった。具体的にはプログラムの改良、あるいは拡張を行っている。また計算結果を設計に用いる場合に必要な事項等を整備している⁹⁾。

(3)プログラムの公開

数値波動水路CADMAS-SURFは、基本的にそのプログラムを日本のみならず世界に公開することを前提に開発されている。公開によって、数値波動水路を実務者に広め、耐波設計への数値計算の適用をより促進したいと考えている。また、公開によって、多くの研究者がこのプログラムを利用し、さらなる発展に貢献されることを期待している。そのため、CADMAS-SURFの開発にあたっては、将来的な改良や拡張がしやすいように配慮し、プログラムを作成している。共同研究会は一応終了したが、専門委員を中心とした幹事会を沿岸開発技術研究センターに設置し、改良のための情報の普及・整理にあたることとなっている。

なお、プログラムは解説書(共同研究会報告書⁹⁾)にロードモジュールをCD-ROMで付けており、ソースプログラムも、沿岸開発技術研究センターのホームページ(<http://www.cdit.or.jp/>)からダウンロードできるようにする予定である。

2. 数値波動水路CADMAS-SURFの機能

(1) 概要

自由表面など移動境界を有する流れ場に対しての数値計算法として、高さ関数による方法、マーカー粒子を追跡するMAC法¹⁰⁾、Lagrange座標系によるALE

法¹¹⁾、境界適合座標法等がよく知られている。また近年、密度関数法¹²⁾、Level Set法¹³⁾、C-CUP法¹⁴⁾、粒子法¹⁵⁾などの新しい手法も開発され、我が国の海岸工学の分野でも多くの成果^{16)~22)}が挙げられている。これらの手法の中でも、Hirtら⁵⁾によるVOF法は、実用的でしかも複雑な自由表面を取り扱うことが可能な優れた手法といえる。

本研究会で開発された数値波動水路CADMAS-SURFは、自由表面が多価関数となる複雑な波動場を精度よく解析できるように、汎用性の高い自由表面解析モデルVOF法と流動解析モデルSMAC法²³⁾に基づいた数値モデルである。主な機能は表-1に示すとおりである。

(2) 基本物理モデル

海岸域における波浪場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須である。このため、基礎方程式には、2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes(Reynolds)方程式をポーラスモデル²⁴⁾に基づいて拡張した式(1)~(3)を用いた。

・連続式

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

・運動方程式

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ & - D_x u + S_u - R_x \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\ & - D_x w + S_w - R_z - \gamma_\nu g \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 t は時間、 x, z は水平、鉛直座標、 u, w は流速の水平、鉛直成分、 ρ は密度、 p は圧力、 ν_e は分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g は重力加速度、 γ_ν は空隙率、 γ_x, γ_z は水平、鉛直方向の面積透過率である。後述するように、 D_x, D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_p, S_u, S_w は造波ソースのための項である。

係数 $\lambda_\nu, \lambda_x, \lambda_z$ は次式のとおりで、右辺第2項(C_M :慣性力係数)が構造物から受ける慣性力の効果となる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_\nu &= \gamma_\nu + (1 - \gamma_\nu) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一方、多孔質体からの抵抗力 R_x, R_z を、次のように流

表-1 数値波動水路 CADMAS-SURF の機能一覧

項目	機能	
解析対象	・自由表面が多価関数となる複雑な流れ	
基礎方程式	・2次元非圧縮粘性流体の Navier-Stokes (Reynolds) 方程式と連続式をポーラスモデルに基づいて拡張した式	
座標系	・デカルト座標	
自由表面モデル	・Volume of Fluid 法 (VOF 法)	
乱流モデル	・高 Re 数型 $k-\epsilon$ 2 方程式モデル	
造波モデル	・造波境界 ・造波ソース (各造波モデルに以下の造波関数を適用可能)	
物理モデル	造波関数 ・ストークス波第5次近似解 (定形進行波) ・クノイド波第3次近似解 (定形進行波) ・流れ関数法 B による数値解 (定形進行波) ・ピストンタイプ (造波板をモデル化) ・フラップタイプ (造波板をモデル化) ・マトリクスデータ (任意波形)	
無反射モデル	・Sommerfeld の放射境界 ・エネルギー減衰帯	
スカラー量の移流拡散	・多成分のスカラー量の移流拡散計算が可能	
一般の境界条件 (造波・放射境界以外)	・セル単位で任意の位置に構造物を設定可能 ・構造物表面の任意の位置に境界条件を設定可能 ・境界条件の種別は入力データで選択可能	
数値解法とアルゴリズム	離散化	・スタッガード・メッシュを用いた差分法 ・ポーラスモデルを用いた形状近似
	時間積分	・Euler 法 ・Simplified Marker and Cell 法 (SMAC 法)
	移流項 (対流項)	・VOF 関数 F 以外の移流項 (対流項) は以下のいずれかを選択可能 ①1次精度風上差分 ②2次精度中心差分 ③DONOR スキーム (①と②のハイブリッド形式) ④QUICK スキーム ・VOF 関数 F の移流項はドナー・アクセプタ法で離散化
	表面セル流速設定方法	・外挿 (流体側の2点の流速から外挿する) ・勾配ゼロ (流体側の流速と同じにする)
	表面の方向の決定方法	・NASA-VOF3D の方法を採用
	気泡と水滴の処理	・TimerDoor 法
	連立1次方程式の解法	・MILU-BCGSTAB 法
描画機能	時刻制御	・入力値固定 ・自動時刻制御
	指定時刻での場データ (描画部を利用)	・流速ベクトル ・各種物理量の等値線 ・等値線による自由表面 ・流体の存在領域の塗り潰し
	時系列データ (表計算ソフトを利用)	・指定個所の初期水面からの水位変動 ・指定個所の計算値, 他
	アニメーション (動画ソフトを利用)	・一定時間間隔の画像ファイルをビットマップ形式で自動保存

速の2乗に比例する形でモデル化した。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (5)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (6)$$

ここで, C_D は抵抗係数, $\Delta x, \Delta z$ は水平, 鉛直方向の格子間隔である。

さて, 自由表面解析モデル VOF 法では, 本来ステップ関数となる「流体である・ない」を表す関数を計算セルごとに平均化した VOF 関数の移流方程式と, 「流体セル・表面セル (向きを含む)・気体セル」というフラグを逐次計算することにより, 自由表面の挙動を解析する。ポーラスモデルに基づく VOF 関数 F の移流方程式を以下に示す。

$$\gamma_\nu \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (7)$$

ここで, S_F は造波ソースのための項である。なお, VOF 関数 F はボイド率と異なり, 自由表面をシャープに表現するための関数であり, その移流方程式の離散化には表面がばやけけないために特別に工夫されたドナー・アクセプタ法を用いた²⁵⁾。

乱流モデルには, 実用性が高く様々な分野で用いられている高 Re 数型 $k-\epsilon$ 2 方程式モデル²⁶⁾ を採用した。基礎方程式は次式のとおりで, 乱流エネルギー k と乱流エネルギー散逸関数 ϵ の移流拡散方程式である。

$$\gamma_\nu \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u k}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_k \left(\frac{\partial k}{\partial z} \right) \right\} + \gamma_\nu G_s - \gamma_\nu \epsilon \quad (8)$$

$$\gamma_\nu \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \right\} + \gamma_\nu C_1 \frac{\epsilon}{k} G_s - \gamma_\nu C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$G_s = \nu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

ここで, 渦動粘性係数と拡散係数は以下のとおりである。

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad (12)$$

$$\nu_\epsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (13)$$

また, その他の経験定数は, 一般的な値 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ を用いた。

(3) 造波モデル

表-1 に示すとおり, CADMAS-SURF では, 造波モデルとして造波境界と造波ソースの2つを採用し, それぞれの造波モデルで6種類の造波関数 (規則波用5種類, 不規則波用1種類) が利用できる。

造波ソースを使用する場合、指定したセルの中心位置 ($x = x_s$) に造波のためのソース²⁷⁾を設定する必要がある。造波ソースは流速や水位を直接指定する方法ではないため、構造物や斜面等からの反射波を通過させることができ、後述する無反射モデルと組み合わせることで、無反射造波が可能となる。以下に、式(1)~(3)および式(7)中のソース項を示す。

$$S_p = q(z, t) \quad (14)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (15)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (16)$$

$$S_F = Fq(z, t) \quad (17)$$

ここで、 $q(z, t)$ は次式のとおりである。なお、 Δx_s は $x = x_s$ での格子間隔、 $U(z, t)$ は造波用流速を示す。

$$q(z, t) = 2 \frac{U(z, t)}{\Delta x_s} \quad (18)$$

(4) 無反射モデル

CADMAS-SURF では、Sommerfeldの放射条件とエネルギー減衰帯の2種類の無反射モデルを使用できる。

a) Sommerfeldの放射境界

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

ここで、 f は流速等の物理量、 C は波速である。なお、現状では波速 C に微小振幅波の波速を用いているため、非線形性の強い規則波や不規則波への適用にはさらに工夫が必要である。

b) エネルギー減衰帯

エネルギー減衰帯は、1から3波長程度の領域を用いて波のエネルギーを徐々に減衰させることで無反射を実現するものである。このため、計算領域を余分に必要とするが、様々な波形に対して適用可能であり、かつ安定な計算結果が得やすいという利点がある。

CADMAS-SURF では、以下に示すように、流速に比例する減衰項²⁸⁾を運動方程式に付加することにより、エネルギー減衰帯を設定することができる。

$$D_x = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (20)$$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (21)$$

ここで、 N は水深、 l と x_0 はエネルギー減衰帯の広さと開始位置、 N は分布関数の次数、 θ_x と θ_z は無次元の係数である。

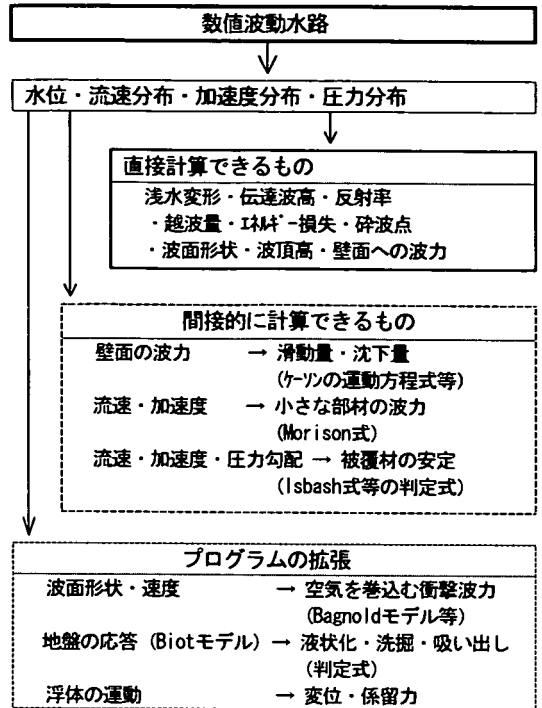


図-1 数値波動水路の適用

(5) CADMAS-SURFの基本性能に対する検討

本研究では、まず、造波、消波、水平床上の波の伝播、浅水変形、碎波波高といった数値波動水路の基本性能について調べ、理論値・実験値等との差が大きい場合は機能の改善を行った。その結果、実用上は十分な精度で現象を再現できるレベルに達したと考えている。ここでは、紙面の関係上、割愛せざるを得ないので、詳細については参考文献⁹⁾を参照していただきたい。

ただし、格子設定や差分スキームによって計算結果が大きく変わる場合もあり、精度の良い結果を得るにはそれなりのノウハウも必要である。また、碎波を伴う場合には1波ごとに変動が生じるため、水理実験と同様、数波分の結果を出力し統計処理するといった工夫も必要であろう。また、碎波時の詳細な波形まで再現することは現状において難しく、今後の課題として残されている。

3. 数値波動水路の耐波設計への活用

(1) 概要

CADMAS-SURF は、波・流れ・地盤の相互作用について数値シミュレーションを迅速かつ容易に行えるものである。すなわち、断面二次元水路で行う従来の水

理模型実験のほとんどをこの数値波動水路で行うことが可能であり、多くの耐波設計に用いることができる。

図-1は、耐波設計への適用性をとりまとめたものであり、直接計算できるものと得られたデータを利用して別途計算できるもの、さらにはプログラムの拡張により可能になるものに分かれる。数値波動水路は、水位や流速、加速度や圧力が計算で求められるため、それから直接浅水変形や伝達波高あるいは壁面への波力が求められる。また、越波量なども堤体上の流速から求めることができ、波の反射率なども検査面を通過する波のパワーを算定することによって求めることができる。本研究会においては、波の遡上、リーフによる波の変形、砕波を伴う様斜面上での波の伝播、段波の伝播など、様々な条件のもとでの波の伝播^{29)~31)}、潜堤周辺の波浪変形と作用波圧、カーテンウォール、没水平板、L型カーテンウォール、ステップ式消波堤などの透過性構造物への作用波圧や透過率³²⁾、直立壁の波力と越波、消波ブロック被覆、半没水型上部斜面堤、直立消波ケーソンなど壁体上構造物の反射率や越波量^{33)~37)}などへの適用を試みている。

また、例えば波力の時系列データがあれば、ケーソンの運動方程式を用いてその滑動量も算定できる。あるいは、加速度や流速から杭などに働く波力も適切に慣性力係数や抗力係数を決めれば算定することができる。研究会では、マウンド周辺の流速からIsbashの式を用いて被覆材の安定性を判定することを検討している³⁸⁾。

一方、個別要素法など他の数値計算法と連携させ、被覆材の安定性を検討することも可能である。さらに、空気を巻き込む場合の衝撃波力についても、Bagnoldモデル等を連動させて数値的に解くことも将来的には可能と思われる。本研究会では、個別要素法^{39)~41)}や地盤解析のFEMプログラム⁴²⁾と連動させて、波・地盤・構造物の相互作用を解く試みを行っている。

以下では、まずCADMAS-SURFを使用するにあたり必要になる通過波検定に関して説明し、次いで、いくつかの適用例を示す。

(2) 通過波検定

耐波設計のために造波水路を用いた水理模型実験を行う場合、通常、構造物の模型を設置する前に対象とする海底地形模型を作成した状態で造波波高を測定する、いわゆる通過波検定を行う。これは、入射波の伝播特性、すなわち海底地形による浅水変形や砕波変形を検討するものである。

実際の設計では特に砕波限界波高を知ることが重要となる。ただし、主として造波装置や水路長等の制限から、対象とする地形の一部を水路に再現し、構造物

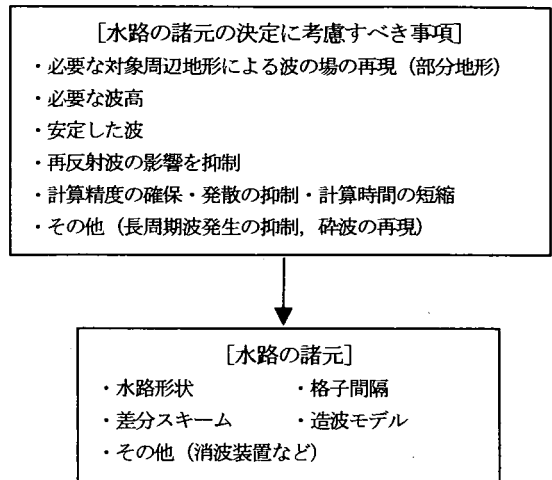


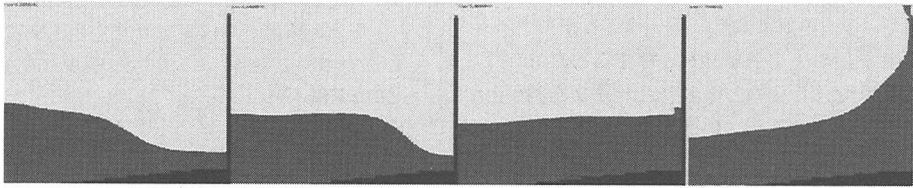
図-2 数値波動水路の諸元の決定に係わる主要事項

付近の通過波を対象に測定することが多い。このとき、たとえば造波位置の水深が小さいと造波板の前で砕波したり、実験に要求される入射波高の波が造波できない等の問題が生じる。このため、造波装置の性能や地形の再現方法などを十分考慮する必要がある。数値波動水路を用いた数値実験では、上記の水理模型実験と同じ目的に加えて、数値計算特有の数値粘性による波高の減衰などの問題があり、通過波を検定することが望ましい。

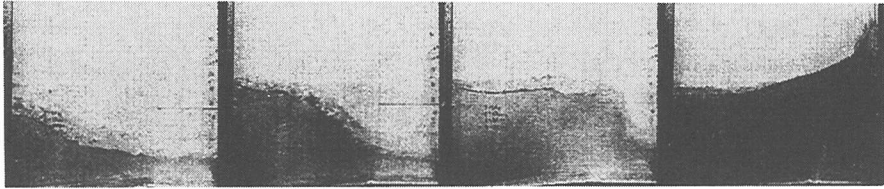
数値波動水路を作成する場合には、対象とする地形を適切に再現し、短い計算時間で十分な精度を得られるような計算領域を設定する必要がある。図-2は、数値波動水路の諸元を決定する場合に考慮すべき事項をとりまとめたものである。下図が数値波動水路の諸元で、上図が諸元の決定に考慮すべき事項であり、作成した数値波動水路による通過波検定で検定すべき項目でもある。それぞれの項目について定量的に満たすべき基準を示すことは困難であるが、水理模型実験と同程度のレベルあるいはそれ以上を満たすことが必要である。また、こうした条件に適する波を検討対象波に選定する必要がある。

なお、通過波検定で特に必要な測定項目には、以下のものが挙げられる。

- ① 造波位置、構造物位置、その周辺（設計波力を対象とする場合、設計有義波高の5波高前）での水位変動、波形
- ② 波高および浅水係数、砕波の程度（砕波限界波高、砕波点、砕波形状）
- ③ 波のエネルギーフラックス

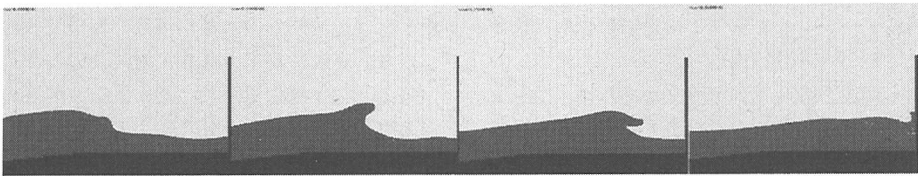


(a) 計算 (0.2 s 間隔)

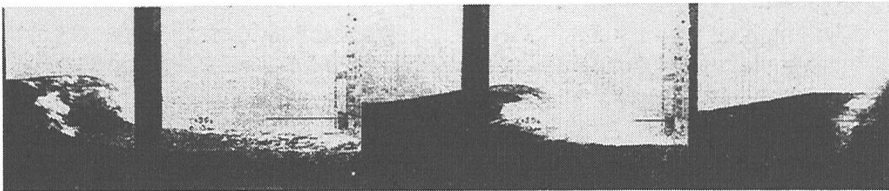


(b) 実験写真

図-3 直立壁に衝突する際の空間波形 ($B_1 = 0.25 \text{ m}$)



(a) 計算 (0.2 s 間隔)



(b) 実験写真

図-4 直立壁に衝突する際の空間波形 ($B_1 = 1.75 \text{ m}$)

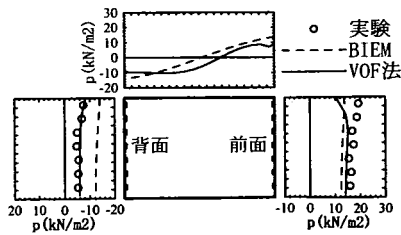
(3) 構造物に作用する波力

まず、高橋ら⁴³⁾による直立ケーソン壁への波の衝突に関する実験との比較を示す。ただし実験では全長 160 m の水路を使用し、沖側が水深 80 cm の水平床 (約 130 m)、中間が勾配 1/10 の斜面 (4 m)、岸側が水深 40 cm の水平床とした地形を作成し、岸側水平床端部から B_1 の位置にケーソン壁を設置した。 B_1 は 0.25 m から 2 m まで 8 通り設定した。それに対し、計算では計算時間短縮のため沖側水平床部を短縮し全長 50 m の水路として計算した。

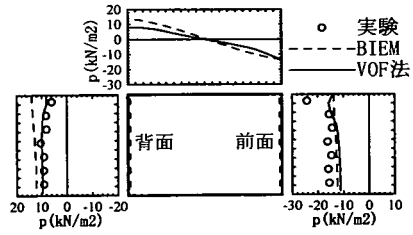
図-3 は碎波寸前の波面が壁面に衝突し、いわゆる Wagner 型の波圧が観測される場合である。図-4 は碎波後に壁面に衝突し、いわゆる Bagnold 型の波圧が観

測される場合である。計算は第 4 波目の波を使用した。実験写真の位相と計算の位相を一致させて比較することは困難であるが、計算結果はどちらのケースも実験で得られた時間変化を良好に再現していることがわかる。壁面で観測される波圧についても、概ね実験と一致した傾向が得られた。

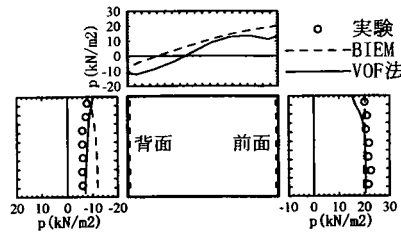
次に、単純な矩形断面の潜堤を用いた水理模型実験を行い、数値波動水路を用いて潜堤に作用する波圧を再現した結果を示す。実験は 1/60 スケールを想定し、現地換算で、沖側が水深 39.4 m の水平床 (280 m)、中間が勾配 1/30 の斜面 (720 m)、岸側が水深 15.4 m の水平床 (1000 m) で、岸側水平床端部付近に高さ 10.4 m、長さ 20 m の潜堤模型が設置してある。入射波は、波高



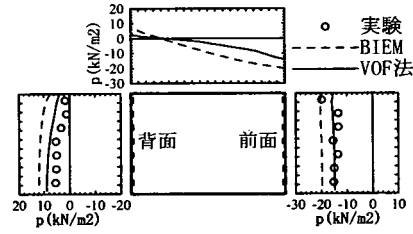
(a) $T=8s$



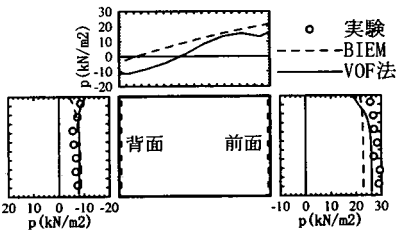
(a) $T=8s$



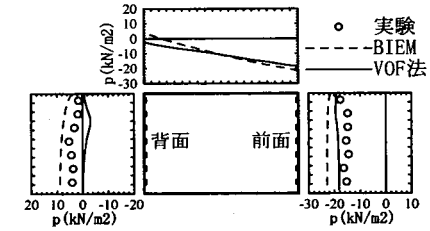
(b) $T=12s$



(b) $T=12s$



(c) $T=16s$



(c) $T=16s$

図-5 (a) 押し波時の波圧分布

図-5 (b) 引き波時の波圧分布

1種類 ($H=4\text{m}$), 周期5種類 ($T=8, 10, 12, 14, 16\text{s}$) の規則波である。

計算では、移流項の差分スキームをDONOR-0.2 (1次風上差分と2次中心差分の重みをそれぞれ0.2, 0.8として重ね合わせ) とし、鉛直格子間隔は0.8m, 水平格子間隔は $L/80$ を目安に周期に応じて1.25mから2.5mに設定した。

代表的なケースにおける押し波時および引き波時の波圧分布をそれぞれ図-5 (a), (b) に示す。数値波動水路の計算結果 (VOF法: 実線) は全般的に実験結果を良好に再現していることがわかる。これに対して、境界積分方程式法 (BIEM: 点線) による計算結果では、押し波時の堤体前面波圧は実験値と良く一致しているものの、背面波圧の精度が悪くなっている。また、周期が長いケースの引き波時には堤体前面でも誤差が大きく、水平合力が引き波時に過大評価される。

これにより、天端没水深の浅い潜堤周辺のような非線形性が強い波浪変形に対しても数値波動水路は良好

な精度を有しており、BIEMより優れていることがわかった。

次に、下部に水深の30%程度の開口部を有し、透過率の比較的高い構造であるカーテンウォール構造物の波力特性について、興野らの水理実験結果⁴⁴⁾と解析結果と比較することにより数値波動水路の適用性を検討した。ただし実験は長さ51m×幅0.9m×高さ1.2mの吸収式不規則波造波装置付きの二次元水路を用いて、実験縮尺1/25で実施した。カーテンウォール模型は、現地換算値で水深 $h=14.5\text{m}$ の水平床部分に設置し、開口高を5.0m (開口高 d /水深 $h=0.35$)、天端高を $\text{HWL}+1.5\text{m}$ とした。

図-6に、 $H=3.1\text{m}$, $T=14\text{s}$ のケースにおける押し波時の流況を示す。 $t/T=12.3125$ にカーテンウォール中段以深から開口部に流れる顕著な流れが存在し、その流れがカーテンウォール背後で急速に水位上昇させるような鉛直方向の流れになっているのがわかる。引き波時にも、押し波時ほど顕著ではないが、開口部から沖

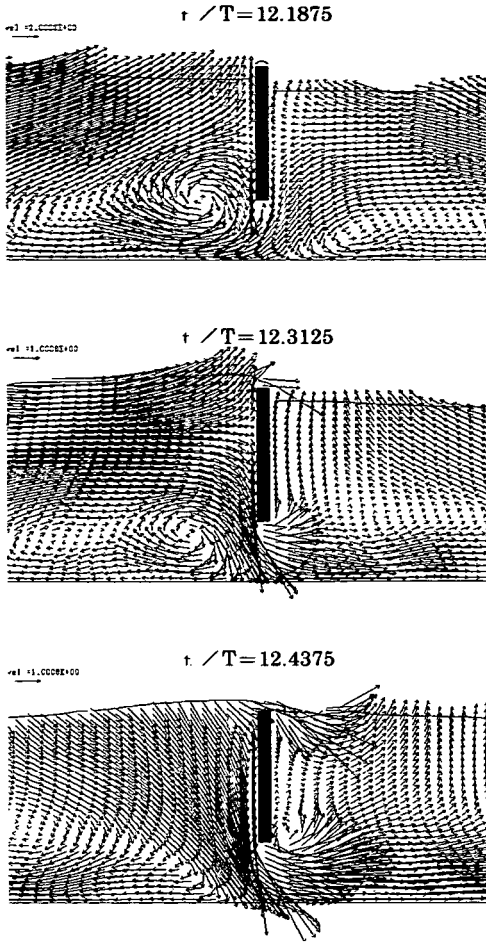


図-6 流速ベクトルの変化 ($H = 3.1\text{ m}$, $T = 14\text{ s}$)

側への流れが発生する。また、カーテンウォール開口部近傍では、押波時、引波時とも部分的に渦が生じている。

図-7に水平波力最大時におけるカーテンウォール前面、背面波圧分布の実験値と計算値の比較を示す。前面、背面とも実験値と計算値は良く一致している。特に、前面波圧分布では、カーテンウォール上部および開口部近傍において波圧が小さくなる傾向が良く再現できている。

(4) 越波流量

従来用いられている越波流量算定図⁴⁵⁾やこれを定式化した越波流量算定式⁴⁶⁾は実務上有用である。しかし、適用条件が限定されることから、現地適用に際しては今まで水理模型実験などで確認する必要がある。ここでは、数値波動水路の適用性を検討するため、榊山・今井⁴⁷⁾による一様水深上の消波護岸の越波に関する二次元水理模型実験結果との比較を行い、考察

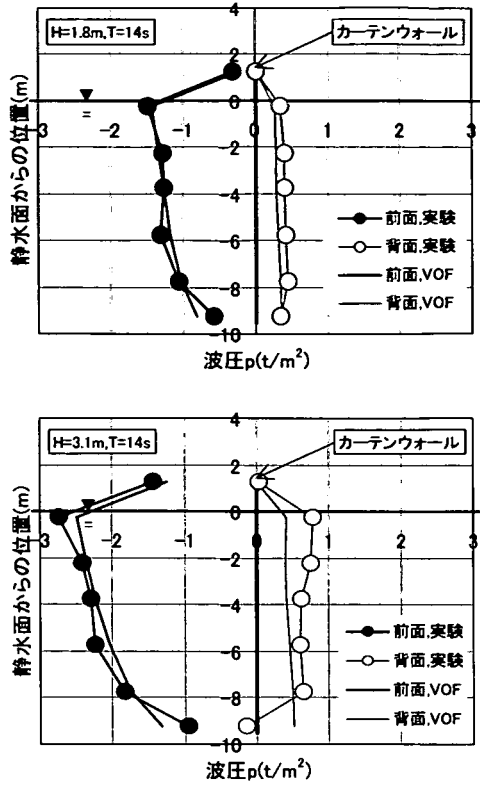


図-7 カーテンウォールに作用する波圧分布

を加えた。

実験は長さ 20m、幅 0.30m、深さ 0.55m の反射波吸収式二次元造波水路を用い、水深 30cm の一様水深部に天端高 5cm、幅(岸沖方向) 30cm のケーソンと消波工の模型を設置して行われたものである。消波工は、重さ $W = 60\text{ g}$ のテトラポッドで天端幅 2個並び、法面勾配 3/4 である。測定項目は越波流量、ケーソン壁面での水位変動である。越波測定では、ロードセル 4 台で測定した越波升(容量 $\approx 15000\text{ cm}^3$) 内への越波の流入重量の経時変化から 1 波ごとの越波流量を算出し、安定した時間での平均値を求めてその波浪条件での越波流量としている。実験条件は、波高 4 種類、周期 4 種類の規則波に対して行われているが、ここでは波高 10cm、周期 1.4s のケースを中心に波高と周期を変化させた合計 5 ケースの結果を示す。

計算においては、水平格子間隔 1.0cm、鉛直格子間隔 0.5cm とした。移流項差分は DONOR-0.1 とした。直立壁前面に設置した消波ブロックの諸元は、空隙率・慣性力係数・抗力係数で与えられる。榊山・今井⁴⁷⁾に倣って消波工の空隙率は 0.5 で一定とし、慣性力係数 C_M は 1.5、抗力係数 C_D は 0.9 とした。

図-8 に、 $H = 10\text{ cm}$, $T = 1.4\text{ s}$ のケースにおける越

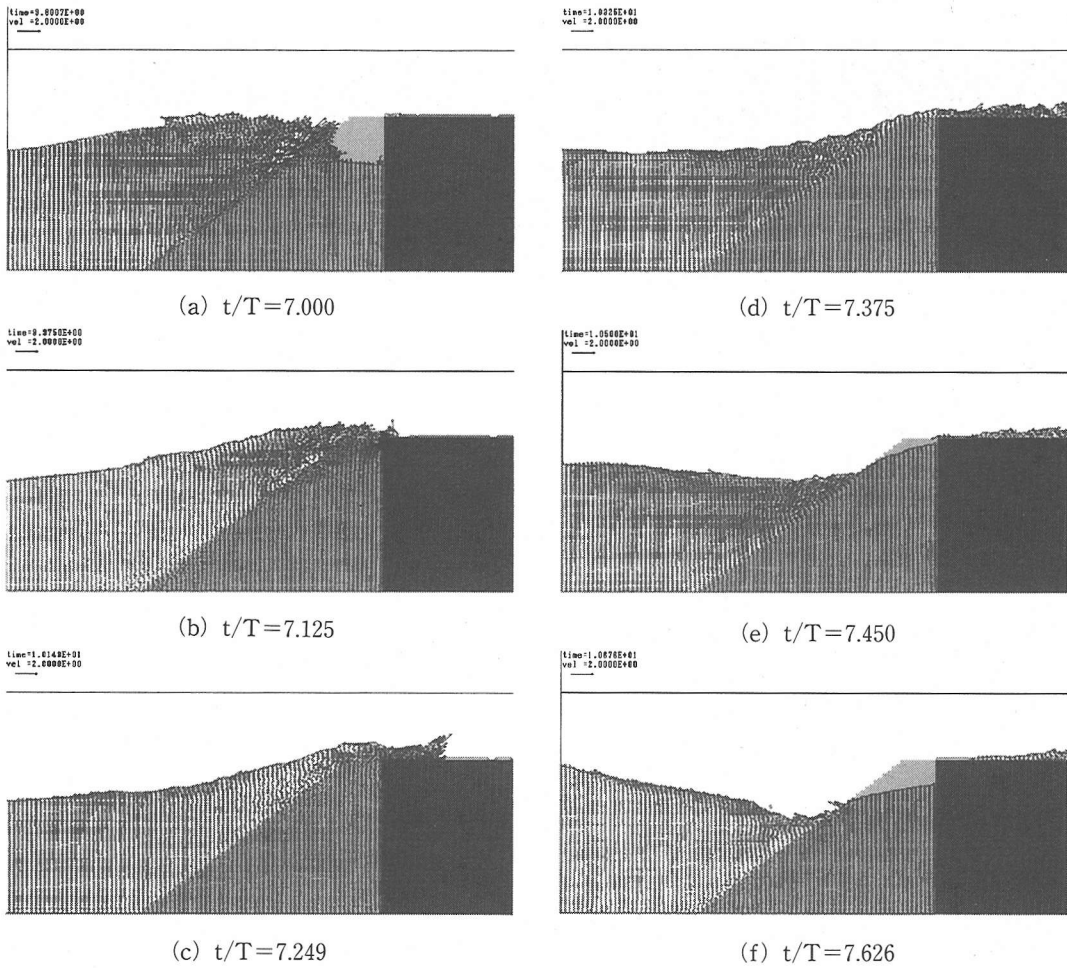


図-8 消波護岸の越波の流速ベクトル ($H = 10 \text{ cm}$, $T = 1.4 \text{ s}$, DONOR-0.1)

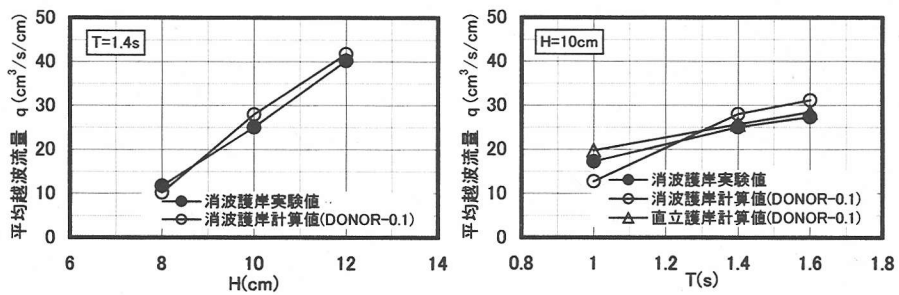


図-9 平均越波流量の比較

波の状況を $T/8$ ごとに示した。(a), (b) で法面を越上する波と消波工内部を流下する波が干渉して複雑な流速ベクトルを形成し、下降した消波工内部の水位が越上波より応答が遅れて上昇の様子や、(c) で越波した波が天端上を流れ始め、(d)~(f) で波が引くのと天端上を水平に流れる様子は、榊山・今井⁴⁷⁾の計算結果

とほぼ一致する。

図-9 に平均越波流量の実験値⁴⁷⁾と計算値の比較を示す。左側は $T = 1.4 \text{ s}$ と周期を一定にした場合の波高による相違を、右側は $H = 10 \text{ cm}$ と波高を一定にした場合の周期による相違を比較した。また右図には比較のため消波工を除いた直立護岸での計算値も併せて

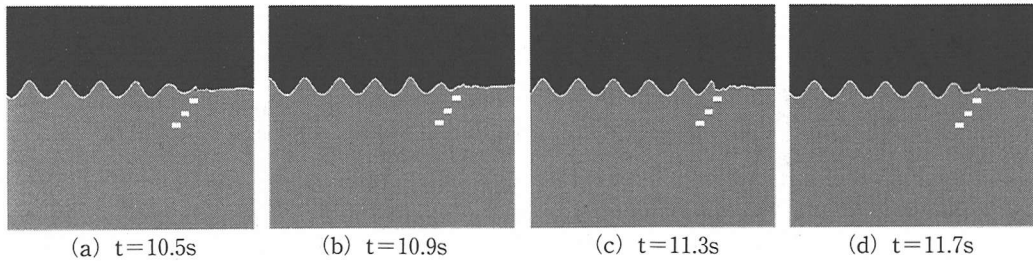


図-10 ステップ式消波堤周辺の波形変形

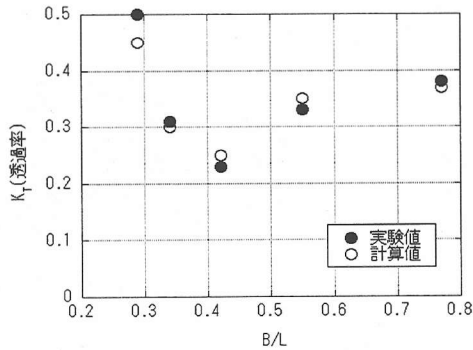


図-11 ステップ式消波堤の透過率

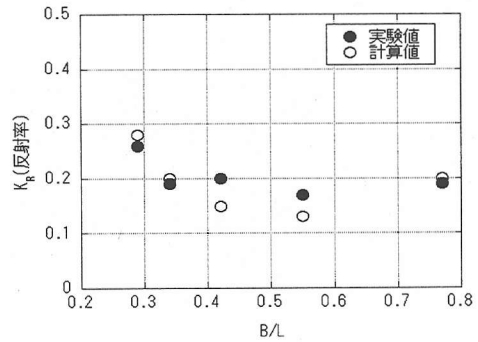


図-12 ステップ式消波堤の反射率

示した。実験値，計算値とも波ごとの周期に対する平均越波流量が安定した部分の平均値を用いた。両図とも波高および周期とともに越波流量が大きくなる傾向は実験値と一致している。周期が短い $T = 1.0\text{s}$ ではやや計算値が実験値より小さいが，計算/実験=0.87~1.15で計算値と実験値は良く一致し，榊山・今井の計算結果より計算の再現性が向上した。また右図において周期が短い $T = 1.0\text{s}$ では消波工のエネルギー減衰効果により消波護岸の方が直立護岸より越波流量が小さいが， $T = 1.4, 1.6\text{s}$ では波の遡上効果が消波工のエネルギー減衰効果よりも相対的に卓越するため，消波護岸の方が直立護岸より越波流量が大きくなることは榊山・今井の結果と一致した。

(5) 反射率・透過率

まず，ステップ式消波堤の消波特性を取り上げる。ステップ式消波堤とは，複数の水平板を水中に階段状に沈めることにより消波機能を持たせた構造物である。水理模型実験は，長さ 60m，幅 0.7m，深さ 1.5m の水槽で行った³²⁾。造波装置から 40m の地点にステップ式消波堤を設置している。水深は 1m である。

図-10 は，入射波(周期 1.12s)がステップ式消波堤上を進行していく時の波形変化を示す。通過した波が短波長の成分波に分裂していく様子がよく表現されている。そして最後の 3 枚目の没水平板上で碎波が発生

している。実験結果でも同一地点で碎波が確認されており計算結果は実験結果と整合が取れている。

図-11, 12 はそれぞれ計算結果と実験結果に基づく透過率と反射率を示している。図中の横軸は，堤体幅波長比 $B(=1.5\text{m})/L$ である。これらの図より，計算結果は実験結果と良好な一致を示していることがわかる。

次に，直立消波ケーソンの反射率の検討結果を示す。直立消波ケーソンは，「前部に透壁と遊水室を有し，これによって消波効果を発揮するケーソン」⁴⁸⁾であり，低反射で耐波安定に優れている。

ここでは，運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所が実施した実験結果⁴⁹⁾のうち，横スリット壁の直立消波ケーソンに規則波が作用する場合を対象にして計算を行うとともに，既往の実験値や計算結果と比較し，数値波動水路の適用性を検討した。

計算領域の設定では，構造物からの反射波が問題となるため，造波ソースを用いることにし，かつエネルギー減衰帯で消波することとした。造波ソースから沖側に 1 波長の波浪伝播領域を設け，更にその外側に 2 波長分のエネルギー減衰帯を設けた。また造波ソースから岸側に 2 波長の位置を反射率の検査断面とし，そこから 1 波長岸側を構造物設置位置とした。また，越波を対象としないことから，構造物を設置した場合にはその岸側には計算領域を設けず，構造物なしの通過波検定時にのみ 2 波長のエネルギー減衰帯を設けた。

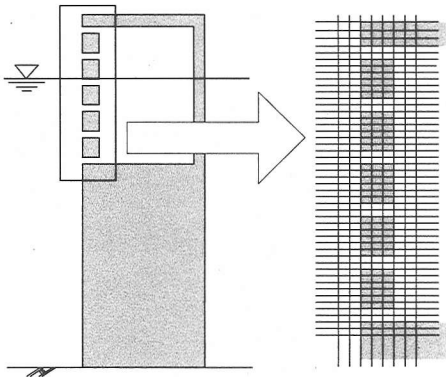


図-13 スリット壁の格子分割例（開口率 0.25）

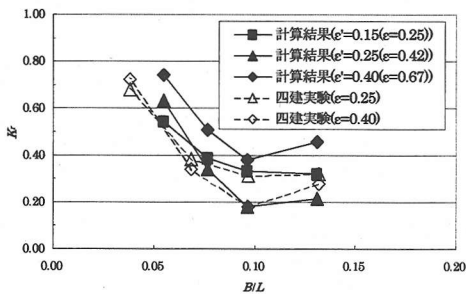


図-14 開口率による反射率

対象とする直立消波ケーソン堤は、スリット壁と遊水室を有する構造が特徴であり、これらを以下のようにモデル化した。格子分割は、基本的に、通常の波浪伝播領域では水平方向の格子サイズを波長の約 $1/80$ とし、堤体位置ではスリット壁の厚さを 3 メッシュで表すことを標準とした。一方、鉛直方向の格子サイズは、横スリット壁の孔を 2 メッシュで表すことを標準とした。ただし、1 メッシュの計算も行っているが、この場合は極端に反射率が低下した。また 3 メッシュの計算では、ほぼ 2 メッシュの場合と同じ計算結果を得ている。堤体部における格子分割の一例を図-13 に示す。

反射率の定義には、反射波と入射波の波高比、エネルギーフラックス比等があるが、ここでは数値計算で流速、圧力、水位の時空間変化が詳細に得られるのでこれらを用いる後者の方法を採用した。

開口率による反射率の違いを図-14 に示す。図の横軸は相対遊水室幅であり、既往の実験結果⁴⁹⁾と数値波動水路による検討結果を比較したもので、開口率 $\epsilon = 0.25$ の場合と 0.4 の場合について示している。

同図より、 B/L による反射率の傾向は、実験値と計算値ともにほぼ同じであるが、開口率の影響は計算値と実験値に以下のような違いが認められる。すなわち、実験結果の $\epsilon = 0.4$ のケースは計算結果の $\epsilon' = 0.25$ に

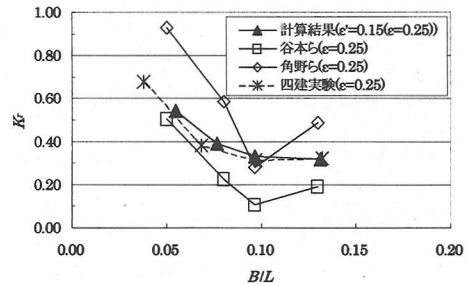


図-15 相対遊水室幅による反射率

近く、実験結果の $\epsilon = 0.25$ は計算結果の $\epsilon' = 0.15$ に近い。この理由は明確ではないが、実際にはスリット空隙部で縮流効果により見かけ上の空隙が小さくなるのに対して、数値波動水路では空隙を鉛直 2 メッシュで表現しているために、その効果を考慮することができないためと考えられる。そこで、数値計算上は開口率を $\epsilon' = C_c \epsilon$ で与える実質開口率の概念を導入した。この横スリットの実験結果の範囲では、 $C_c = 0.6$ 程度を与えることにより数値波動水路を用いた結果は実験結果や解析結果を比較的精度良く再現している。

図-15 は既往の研究^{50),51)}を基に開口率 25% の場合の反射率を算定し、比較したものである。この図において、実験結果と比較する数値波動水路の結果は $\epsilon' = 0.15$ ($C_c = 0.6$) の場合である。計算値と数値波動水路の結果は良く一致しており、谷本らの結果よりやや大きい。一方、角野らの計算結果は実験値より大きくなっていることがわかる。

今回の検討では横スリット壁を対象にしたが、種々の孔の形状に対してもその縮流係数などを考慮するこの計算法が適用できると考えられる。ここでは、数値波動水路の基礎的な機能についての確認を目的としたために規則波を対象としたが、プログラム上では不規則波の造波も可能であり、今後の検討事項である。

4. 数値波動水路の応用

(1) 潜堤の捨石挙動

数値波動水路は流体の基礎方程式を直接的に解析するため、従来の計算手法で取り扱いが困難であった碎波、越波など波動現象の中で最も複雑な現象を取り扱うことができることに利点がある。そのような利点を生かせる数値波動水路の応用として、流体と連成して変形する構造物の挙動を解くことが考えられる。すなわち、耐波設計では、構造物の変形はその機能が維持される範囲内であることが重要で、従来その変形量の照査は水理模型実験によって行われている。この水理模型実験に変わる簡便で経済的な手法として、数値波

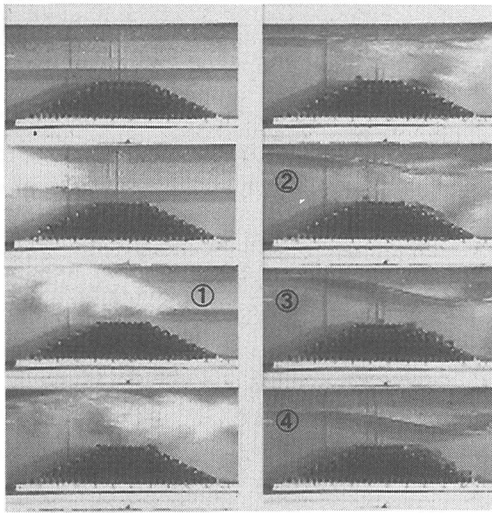


図-16 粒状体構造物の破壊過程の実験結果

動水路と構造物解析手法を組み合わせる方法がある。伊藤ら^{39),41)}は、捨石潜堤を単一粒径の球でモデル化し、数値波動水路と個別要素法^{52),53)}(Discrete Element Method: DEM)を組み合わせる手法を用いてその変形の再現性を検討し、数値波動水路の応用範囲拡張の可能性を検討した。

数値波動水路と個別要素法(DEM)の連成は、以下のような手順で行う。まず、粒状体構造物を多孔質体として流体解析を実施し、粒状体構造物内の流速を用いて流体力を算出する。次に、流体力・重力・浮力等を外力として粒子の運動を個別要素法を用いて計算し、各粒状体の変形に合わせてポーラスモデルの諸量を変化させて次の時刻の流体解析を行う。これを繰り返すことにより、流体運動と構造物の挙動を同時に追跡することが可能になる。

図-16は、捨石潜堤を単一粒径のガラス球でモデル化した水理模型実験を行い、潜堤の破壊過程を撮影した結果で水柱 $H = 60\text{ cm}$ のケースである。実験には吸引式造波装置を使用しており、造波装置の水室内の空気を吸引して高さ H の水柱を発生させ、バルブを開放することにより碎波を伴う強い流れを発生させている。写真において流れは左から右へ進み、写真の時刻は不等間隔である。粒子の動きは水槽幅方向にバラツキがあるが、破壊過程が把握できる。ガラス球の移動は碎波による波の突っ込み時に上下流の法肩部から始まり、著しい粒子の移動は碎波後の水面勾配が大きくなった時間帯に発生していることがわかる。

図-17は図-16と同条件に対する数値計算の結果である。図-16と図-17には①～④が示してあり、実験と計算で時刻が対応している。図-16と図-17の比較

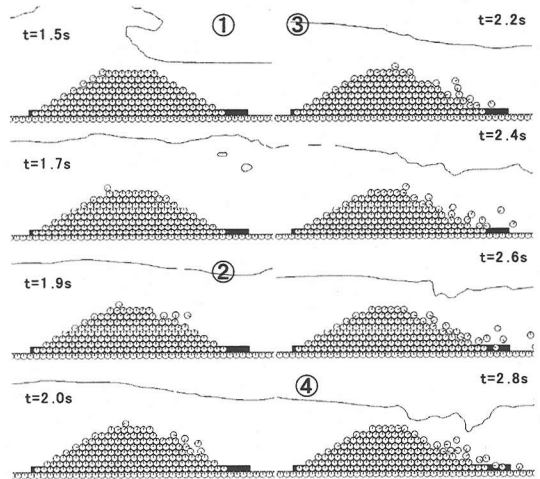


図-17 数値計算の破壊過程 ($H = 60\text{ cm}$)

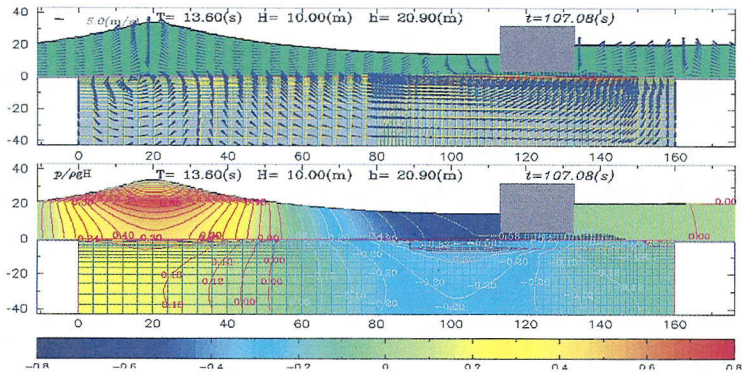
により、①に示した碎波の突っ込みや、②に示した両法肩の移動状況、あるいは③④に見られる破壊過程が再現できていることがわかる。

本計算の流体力算出にはモリソン式を採用したため、流速はポーラスモデルで算出される流速と粒子の相対速度を用いた。さらに、隣接する粒子の遮蔽効果を考慮している。遮蔽効果を考慮しない場合、左法肩が右側に押し出され、破壊規模は過大評価になる⁴¹⁾。ポーラスモデルは多孔質の遮蔽効果なども計算結果に反映されるモデルであるが、実用上の計算格子を考えると、遮蔽効果を流体力算出時に考慮するなどの工夫が必要である。

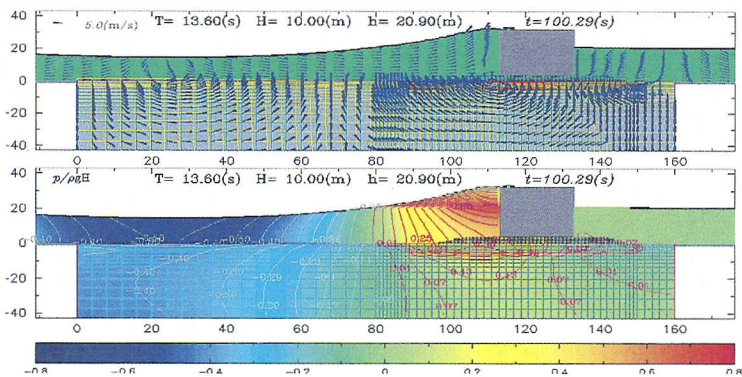
以上のように、DEMとVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーションを実施し実験と比較した結果、数値波動水路と個別要素法による粒状体構造物の変形計算の可能性を示すことができた。

(2) 地盤の応答

地盤の液状化や洗掘・吸い出しが構造物の沈下や破壊の原因と思われるケースでは、構造物と波との相互作用のみならず、その基礎地盤の挙動も含めた総合的な検討が不可欠となってくる。現地で液状化や洗掘・吸い出しが問題となる場合は、碎波帯が多く、碎波しない場合でも、設計波のような碎波限界に近い非線形性の強い波であることがほとんどで、従来の計算方法では現象を再現することは難しい。また越波によって構造物背後が液状化する場合等については従来の計算法ではまったく対応することができない。こうした碎波を含めた非線形性の強い波の場とそれによる地盤・構造物の応答を計算するため、蔭ら⁴²⁾は、数値波動



(a) 波峰時



(b) 波谷時

図-18 混成堤を設置した場合の地盤の応答

水路をベースに波・地盤・構造物の相互作用に関するVOF-FEM予測モデルを構築し、数値波動水路を数値波動地盤水路へと拡張した。

蔣らのモデルは、地盤と水部の解析モデルからなり、接続境界を介してそれらを連成させることにより、波と構造物・海底地盤との非線形干渉による波動場ならびに動的な地盤挙動を時間領域で解析する。水部の計算には数値波動水路を使用する。地盤については、気泡の混入を考慮した圧縮性流体で満たされる多孔質の混合物として海底地盤を取り扱うとともに、それはVoigt型粘弾性体として挙動すると考え、改良したBiotの2相弾性体理論に基づいたFEM解析モデルを使用する。また、ケーソン防波堤など構造物に対しても、単相弾性体として同様にモデル化している。

なお、水部と地盤部はそれぞれ差分法および有限要素法を用いるため、その同時解析には工夫が必要である。ここでは、水と地盤の接続境界での圧力、流速および応力の連続性から、まず数値波動水路を用いて波動場の計算を行い、得られた水圧値を用いて地盤の挙

動を計算し、次に地盤解析で得られた間隙水の流速値を用いて再び水部の計算を行うという疑似連成型の方法を採用している。

まず、構造物のない平坦な砂地盤上を進行波が通過する場合の計算を行い、計算の妥当性を確認した。次に、水部と地盤部に不透過な鉛直壁（不透過性矢板）を設置し重複波が発生する場合、および砂地盤上に捨石マウンドとケーソンからなる混成防波堤を設置した場合について計算を行った。図-18(a)、(b)に混成堤を設置した場合の波峰時および波谷時における地盤の変位速度、間隙水圧の空間分布を示す。計算条件は、水深 $h = 20.0\text{m}$ 、波の周期 $T = 13.6\text{s}$ 、波高 $H = 10.0\text{m}$ 、マウンド上水深 $h_b = 16.0\text{m}$ 、ケーソン幅 $B = 20.0\text{m}$ 、ケーソンの天端高 27.7m 、砂地盤の厚さ $d = 60.0\text{m}$ 、マウンドの透水係数 1.0m/s 、せん断弾性係数 1500tf/m^2 とした。基本的には重複波の場合とほぼ同じ波の場となるが、地盤内に鉛直壁がないために地盤内の間隙水圧などがやや異なっている。マウンドを透過する波と越波によってケーソン背後にも波が伝播し、それに応

じて地盤内に間隙水圧が発生している。

以上の計算結果より、数値波動水路を用いた、波・海底地盤・構造物の連成モデルにより、それらの相互作用の現象を合理的に再現できることが示された。もちろん、こうした複雑な問題への適用性については、今後、実験データなどを用いた更なる検証が必要であるが、耐波設計における数値波動水路の可能性を示すことができた。

5. まとめ

(1) 現状のプログラムの問題点

表-2は、実際に計算を行って明らかとなった、数値波動水路 (CADMAS-SURF V4.0) の現状での問題点である。計算時間については、大量の計算を行っているために、数時間あるいはそれ以上の時間がかかる場合が少なくない。ただし、これについては、パーソナルコンピュータの発展は著しく、年とともに解決されていくと思われる。なお、本プログラムはその汎用性や拡張性を考慮しており、高速化するためにプログラムを複雑にすることは避けている。

一方、波形の再現性についてはかなり満足すべきレベルに達しているが、数値粘性に伴う波高の減衰や碎波の再現性など、この数値計算法の限界と思われる問題点も指摘されている。また、耐波設計において重要となる波圧波形についても、かなり満足すべき結果を得ている。特に衝撃的な波圧に対してもある程度計算できるようになった点は、大きな成果の一つである。ただし、さらなる検討が必要なことはいうまでもない。なお、構造物がある場合についても、全体としてはかなり満足すべき計算結果を得ているが、表に示すようないくつかの問題点が個々の海域構造物に対して指摘されている。

(2) プログラムの改良

数値波動水路 (CADMAS-SURF V4.0) は、これまでの研究会メンバーだけでなく、公開によって多くの研究者や技術者によって今後改良されていくと考えられる。

表-3は、プログラムの改良点についてまとめたものである。たとえば、プログラム機能の追加、あるいは他の構造物の耐波設計への適用性の検討を行う必要がある。また、個別要素法などの他のプログラムとの連動についても、より組織的な研究が望まれる。

さらに、数値波動水路プログラムの3次元化は将来のこのプログラムの発展の方向として誰もが認めるところである。技術的には現在の断面2次元プログラム

表-2 現状のプログラムの問題点

①計算時間
②波形の再現性
・数値粘性によるエネルギー減衰 (波の伝播による数値減衰)
・造波に伴う水位の増加
・碎波の再現性
③波圧の再現性
・圧力ノイズ (空気圧縮圧力の取り込み)
④構造物がある場合の流速と圧力の再現
・慣性力係数などのパラメータの設定
・スリット壁などの空隙や抵抗に関するパラメータの設定
・構造物によるエネルギー減衰の適切な再現
・越波量・伝達波の誤差

表-3 プログラムの改良

①プログラムの問題点の解決
②プログラムの機能の追加
・造波境界における反射吸収機能の追加
・碎波時のエネルギー減衰モデルの追加
・不規則波を造波する機能の拡張
③種々の耐波設計への適用
④他のプログラムとの連動
・地盤プログラムとの連動 (洗掘・吸い出し)
・被覆石などの移動のプログラムとの連動
・浮体運動プログラムとの連動
⑤3次元化 (数値波動水路)
・水路規模の3次元計算
・広い範囲の3次元計算 (ネステッドモデルなど)

の延長であり、すでに汎用的な流体解析プログラム⁵⁴⁾もいくつか作られており、川崎・岩田^{17),55)}等の研究もある。現状では計算時間等で実用的ではないと考えられるが、水路に杭がある場合のように限られたケースから適用されていくことが考えられる。また、平面2次元プログラムと連携させて利用していくことも考えられる⁵⁶⁾。いずれにせよ、将来的には、次第により広範囲の3次元的な問題が取り扱われるようになるであろう。なお共同研究会では、計算量の問題から、当面の目標を断面二次元計算にとどめたが、プログラムの作成にあたっては、将来的にそうした拡張性を有するよう配慮している。

(3) 数値波動水路と性能設計

21世紀の土木技術者は、構造物の破壊確率、変形の程度、破壊の影響、そして必要な維持管理などを設計時に明らかにすることを求められると考えられる。すなわち、建設される構造物の性能をより詳細に、また正確に示すことが重要になっている^{57),58)}。

高度な性能照査を広範囲に行うためには、従来の水理模型実験だけでなく、精度のよい数値計算法が不可欠である。数値波動水路は、こうした高度な性能照査を大量に行える設計の道具として非常に重要である。また、数値計算では現象の可視化が容易であり、将来の性能設計で重要である市民への説明にも適している。

図-19は、将来の耐波設計法と数値計算の関係を示

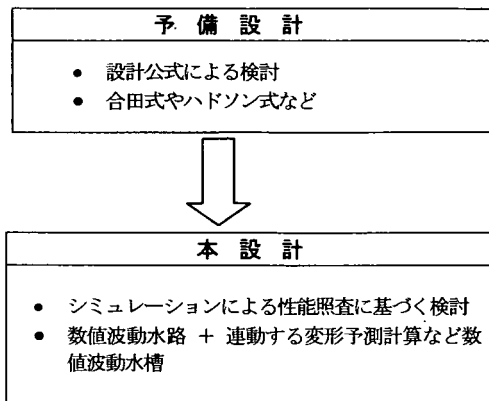


図-19 将来の耐波設計法と数値計算

すものであり、重要な海域施設における耐波設計の考え方を示すものである。予備的な設計では、従来の公式（合田式やハドソン式など）で断面などの検討を行い、本設計では、性能設計的な考え方にに基づく検討が必要と思われる。すなわち性能設計では、数値計算によってシミュレーションを数多く行い、それぞれの設計レベルの外力に対する機能や耐波安定性能を明らかにして、最適な断面などの検討を行うべきである。

(4) おわりに

この研究会の準備会が始まった平成10年始め頃は、それまでのワークステーションと同等な性能を持ったパーソナルコンピューターが気軽に購入できるようになったときであった。それ以前であれば、数値波動水路の計算となればワークステーションやスーパーコンピューターを使わなければならなかった。そうなれば、なかなか小回りをきかせて色々な試行をやってみるといのは大変になる。その意味では研究会を始めるには絶好のタイミングであったと思われる。それに加えて、パーソナルコンピューター上でのアニメーションソフトも普及し、数値波動水路における計算結果はその材料としても絶好となった。

このように計算機の環境が整ったことを背景とし、研究会の成果がまとまったことから、まさに数値実験と呼ぶにふさわしいことができる段階に来たと言える。ノート型のパーソナルコンピューターを携帯して、問題に対応した計算条件を与えることにより、現象を気軽にアニメーションで見ることができるといのも、夢ではなくなっている。そうなれば、数値波動水路は専門家に限らず、一般の人々にも身近なものとなるであろう。

なお、最後になったが、本研究会のメンバーは以下のとおりである。

- 委員長 磯部 雅彦 (東京大学大学院)
- 特別委員 高橋 重雄 (港湾空港技術研究所)
- 〃 有川 太郎 (港湾空港技術研究所)
- 〃 蔣 勤 (元運輸省港湾技術研究所)
- 〃 余 錫平 (中国 北京清華大学 水利工学科)
- 〃 藤間 功司 (防衛大学校 システム工学群)
- 〃 川崎 浩司 (大阪大学大学院 工学研究科)
- 〃 榊山 勉 (電力中央研究所 我孫子研究所)
- 委員 池谷 毅 (鹿島 技術研究所)
- 〃 高橋 俊彦 (鹿島 技術研究所)
- 〃 朝倉 良介 (鹿島 技術研究所)
- 〃 目見田 哲 (関西電力 総合技術研究所)
- 〃 八木 典昭 (関西電力 総合技術研究所)
- 〃 関本 恒浩 (五洋建設 技術研究所)
- 〃 清水 琢三 (五洋建設 企画部)
- 〃 森屋 陽一 (五洋建設 技術研究所)
- 〃 藤田 龍 (五洋建設 技術研究所)
- 〃 勝井 秀博 (大成建設 技術センター)
- 〃 伊藤 一教 (大成建設 技術センター)
- 〃 中村 昭男 (中部電力 電力技術研究所)
- 〃 佐藤 勝弘 (テトラ 環境事業本部)
- 〃 松本 朗 (テトラ 環境事業本部)
- 〃 五明美智男 (東亜建設工業 技術研究所)
- 〃 青野 利夫 (東亜建設工業 技術研究所)
- 〃 興野 俊也 (東京電力 電力技術研究所)
- 〃 中野 修 (東京電力 建設部)
- 〃 藤井 直樹 (東電設計 第二土木本部)
- 〃 藤原 隆一 (東洋建設 土木本部土木設計部)
- 〃 小竹 康夫 (東洋建設 総合技術研究所)
- 事務局 鶴谷 廣一 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 山谷 弘幸 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 北澤 壮介 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 和田 耕造 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 田所 篤博 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 大山 洋志 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 松下 泰弘 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 宮脇 豊 (沿岸開発技術研究センター)
- 〃 島田 昭男 (富士総合研究所)
- 〃 浜野明千宏 (富士総合研究所)
- 〃 秋山 実 (富士総合研究所)
- 〃 大島 茂敬 (富士総合研究所)

参考文献

- 1) 宮崎正衛, 宇野木早苗, 上野武夫: 伊勢湾台風による高潮とその理論計算について, 第7回海岸工学講演会講演集, pp.209-215, 1960.
- 2) 土木学会(編): 越波と打ち上げ, 海岸施設設計便覧, pp.98-104, 2000.
- 3) 磯部雅彦: 波浪変形解析のための波動方程式の比較研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.1-14, 1994.
- 4) Troch, P.: VOFbreak2, A numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters, *Proc. 27th IAHR Congress, San Francisco*, pp.1366-1371, 1997.
- 5) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, *J. Computational Phys.*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 6) 磯部雅彦, 高橋重雄, 余錫平, 榊山勉, 藤間功司, 川崎浩司, 蔣勤, 秋山実, 大山洋志: 数値波動水路の防波設計への適用に関する研究—VOF法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, Vol.15, pp.321-326, 1999.
- 7) 磯部雅彦, 余錫平, 梅村幸一郎, 高橋重雄: 数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.39-40, 1999.
- 8) 蔣勤, 高橋重雄, 磯部雅彦: 防波堤の波力算定への数値波動水路の適用性について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.41-45, 1999.
- 9) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路 (CADMAS-SURF)の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー No.12, 296p, 2001.
- 10) Harlow, F. H. and Welch, J. E.: Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Physics of Fluid*, Vol.8, No.12, pp.2182-2189, 1965.
- 11) Hirt, C. W., Amsden, A. and Cook, J.: An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds, *J. Comp. Phys.*, Vol.14, pp.227-253, 1972.
- 12) Miyata, H., Katsumata, M., Lee, Y. G. and Kajitani, H.: A finite-difference simulation method for strongly interacting two-layer flow, *J. Soc. Naval Archit, Japan*, Vol.163, pp.1-16, 1988.
- 13) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S.: A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow, *J. Comp. Phys.*, Vol.114, pp.146-159, 1994.
- 14) Yabe, T. and Wang, P. Y.: Unified numerical procedure for compressible and incompressible fluid, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.60, No.7, pp.2105-2108, 1991.
- 15) 越塚誠一: 数値流体力学, 培風館, 223p, 1997.
- 16) 藤間功司, 後藤智明, 首藤伸夫: 非線形分散波理論の数値的な検討, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.93-97, 1984.
- 17) 川崎浩司, 岩田好一郎: 3次元波浪場に設置された潜堤による spilling 型砕波の変形過程に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.96-100, 1996.
- 18) 榊山勉, 香山真裕: 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.696-700, 1997.
- 19) 谷本勝利, 趙群, 中村廣昭: LES-VOF法によるリーフ上での数値波動解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.151-155, 1998.
- 20) 細山田得三, 吉田茂, 早川典生, 大飼直之, 中田芳貴: SOLA-VOF法による潜堤周辺の波動場の3次元計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.157-160, 1998.
- 21) 渡辺靖憲, 佐伯浩: 砕波帯内の流速場のダイレクトシミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.71-75, 1996.
- 22) 陸田秀実, 河合ひろみ, 安田孝志: C-CUP法による気液界面の直接数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.55-59, 1998.
- 23) Amsden, A. A. and Harlow, F. H.: A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, *J. Computational Phys.*, Vol.6, pp.322-325, 1970.
- 24) 榊山勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: 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, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.554-558, 1990.
- 25) Torrey, M. D., Mjolsness, R. C. and Stein, L. R.: NASA-VOF3D: A three-dimensional computer program for incompressible flows with free surface, LA 11009-MS, 1987.
- 26) 数値流体力学編集委員会(編): 乱流解析, 数値流体力学シリーズ3, 東京大学出版会, 314p, 1995.
- 27) 岩田好一郎, 川崎浩司, 金度三: 水中構造物による砕波の数値計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.781-785, 1994.
- 28) Eric Cruz, 横木裕宗, 磯部雅彦, 渡辺見: 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.46-50, 1993.
- 29) 高橋俊彦, 池谷毅: 数値波動水路のリーフ上の波浪変形への適用, 海洋開発論文集, Vol.16, pp.69-74, 2000.
- 30) 川崎浩司, 村瀬政善, 岩田好一郎, 一様傾斜水域での砕波に伴う水中圧力の時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.161-165, 2000.
- 31) 高橋俊彦, 藤間功司, 朝倉良介, 池谷毅: 数値波動水路の段波実験への適用, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.281-286, 2001.
- 32) 高橋俊彦, 池谷毅: 数値波動水路のステップ式消波堤への適用, 第55回年次学術講演会講演概要集, pp.60-61, 2000.
- 33) 藤井直樹, 青野利夫, 興野俊也, 中野修, 五明美智男, 阿部光信: ケーソン防波堤の越波・波力算定への数値波動水路の適用, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.706-710, 2000.
- 34) 中野修, 興野俊也, 藤井直樹, 榊山勉, 大熊義夫: 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.731-735, 2001.
- 35) 佐貫宏, 藤田龍, 関本恒浩, 清水琢三: 数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.736-740, 2001.
- 36) 有川太郎, 磯部雅彦, 高橋重雄: VOF法を用いた衝撃砕波圧の計算と適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.831-835, 2001.
- 37) 小竹康雄, 松村章子, 藤原隆一, 高橋重雄, 磯部雅彦: 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, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1016-1020, 2001.
- 38) 松本朗, 高橋重雄: 流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.911-915, 2001.
- 39) 伊藤一教, 東江隆夫, 勝井秀博: DEM法とVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.746-750, 2000.
- 40) 藤井直樹, 興野俊也, 安田勝則, 大熊義夫: 個別要素法によるケーソン防波堤の滑動計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.801-805, 2001.
- 41) 伊藤一教, 樋口雄一, 東江隆夫, 勝井秀博: 個別要素法

- に基づく捨石のランダム性を考慮した潜堤の変形予測手法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.806-810, 2001.
- 42) 蔣勤, 高橋重雄, 村西佳美, 磯部雅彦: 波・地盤・構造物の相互作用に関するVOF-FEM予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.51-55, 2000.
 - 43) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木諭司: 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第22巻, 第4号, pp.3-31, 1983.
 - 44) 奥野俊也, 榊山勉, 柴田学, 中野修, 大熊義夫: 下部透過式カーテンウォール構造物に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.791-795, 1999.
 - 45) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44, 1975.
 - 46) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205, 1982.
 - 47) 榊山勉, 今井澄雄: 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.696-700, 1996.
 - 48) 運輸省港湾局(監修): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 社団法人日本港湾協会, 1999.
 - 49) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所: 直立消波構造物の消波特性について—水理模型実験報告(断面実験)—, 31p, 1982.
 - 50) 谷本勝利, 吉本靖俊: 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, 港湾技術研究所報告, 運輸省港湾技術研究所, 第21巻, 第3号, pp.43-77, 1982.
 - 51) 角野昇八, 小田一紀, 重松孝昌, 芳田利春: 広周波数帯にわたって低反射機能を有する直立消波工の開発, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.557-561, 1988.
 - 52) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, No.29, pp.47-65, 1979.
 - 53) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, pp.14-25, 1997.
 - 54) 富士総合研究所(編): 汎用流体解析システム—FUJIRIC/ α -FLOW—, 丸善, 446p, 1993.
 - 55) 川崎浩司, 岩田好一朗: 潜堤による平面2次元波の碎波波形の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.81-85, 1997.
 - 56) 正村憲史, 藤間功司, 後藤智明, 飯田邦彦, 重村利幸: 2次元・3次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析, 土木学会論文集, No.670/II-54, pp.49-61, 2001.
 - 57) 高橋重雄, 河合弘泰, 高山知司: 1999年の台風18号による災害と今後の高潮高波対策について—高潮対策施設の性能照査と性能設計—, 土木学会誌, Vol.85, No.10, pp.67-70, 2000.
 - 58) Takahashi, S. and Shimosako, K.: Performance design for maritime structures and its application to vertical breakwaters—Caisson sliding and deformation-based reliability design, *Proceedings of International Workshop on Advanced Design of maritime Structures in the 21st Century*, Yokosuka, PHRI, 2001.

(2001.12.10 受付)