

水中構造物による碎波の数値解析

岩田好一朗*・川崎浩司**・金 度 三***

1. はじめに

構造物上で強制碎波させることにより大きな消波効果を期待できる水中構造物による碎波変形過程と碎波後の波の特性を熟知することは設計面で重要である。最近、多量の気泡を連行する激しいエネルギーの逸散過程である碎波現象を、数値解析により解明しようとする試みが始まったが、その研究例(酒井ら, 1987; 滝川ら, 1991; 正村ら, 1991; 朴・宮田, 1994)は少ない。

本研究では、まず正確に造波できる方法として、ソースによる造波方法(Brørsen・Larsen, 1987)を採用し、簡便かつ3次元への拡張が容易で、強非線形現象に適用可能なSOLA-VOF法(Hirt・Nichols, 1981)を組み合わせた数値解析手法を提案する。ついで、その手法を用いて、2次元波動場に置かれた水中構造物による碎波変形の数値解析を行い、その妥当性を水理実験により検証しようとするものである。

2. 数値解析手法

2.1 基礎方程式

本計算手法で用いる基礎方程式は、非圧縮粘性流体に対する連続方程式と運動方程式に加え、自由表面の挙動を支配する移流方程式からなる。移流方程式については、2.3節で述べることにする。

まず、連続方程式は、解析領域内に造波ソースがあるため以下ようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = q(x, z, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q(x, z, t) = \begin{cases} q^*(z, t) : x = x_s \text{ のとき} \\ 0 : x \neq x_s \text{ のとき} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速成分である。 $q(x, z, t)$ は造波ソース密度を表し、造波位置 $x = x_s$ で $q^*(z, t)$ の強さのわき出しがあり、それ以外は0である。また、 t は時間を表す。

次に、運動方程式は、次式に示すように式(1)を用

いて保存形表示した Navier-Stokes 方程式である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + uq \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \\ = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + wq + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial q}{\partial z} \\ \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 p は圧力、 g は重力加速度、 ρ は流体密度、 ν は動粘性係数を表す。

2.2 計算方法

本計算では、図-1に示すように、解析領域を計算格子(セル)群に分割し、各セルにおいて流速 u, w をセル境界上に、圧力 p 、造波ソース q および VOF 関数 F をセルの中央におく staggered mesh を採用し、それに基づいて基礎方程式の差分近似を行う。なお、図中の Δx と Δz それぞれ x, z 方向のセル間隔を、 (i, k) はセル番号を表す。また、セル全体に流体あるいは気体がある場合をそれぞれ流体セル、気体セル、セル内に流体と気体が存在する場合を表面セル、構造物を表すセルを物体セルと定義する。セルの分類方法については、2.3節で詳しく述べることにする。

造波ソースを考慮した SOLA スキームを用いて、連続方程式(1)と運動方程式(3)、(4)から、次の時間ステップの流速と圧力を算定する(川崎, 1995)。なお、連続方程式を満足させるセルは流体セルのみとする。ただし、後述するように、表面セルでは流速の境界条件に

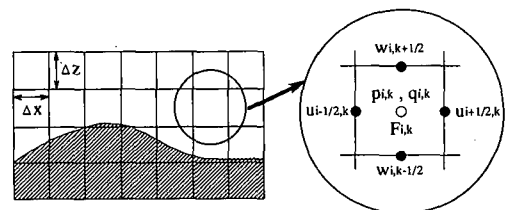


図-1 解析領域および staggered mesh

* 正 会 員 工 博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 工 修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻
 *** 正 会 員 工 博 韓国海洋大学校専任講師 理工大学海洋土木工学科

より連統方程式を満足させる。運動方程式は、流体セルに面している界面での流速を計算するときのみ使う。つまり、表面セルと表面セルまたは表面セルと気体セルに挟まれた界面での流速は計算対象外になり、2.4節で後述するように境界処理から決定される。

2.3 VOF法による自由表面の取り扱い方

自由表面の挙動は、各セルに存在する流体の体積率 F (今後、VOF関数と呼ぶことにする)の移流方程式として、以下のように表現することができる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = Fq \quad \dots\dots\dots(5)$$

VOF関数 F の値により、 $F=0$ のとき気体セル、 $F=1$ のとき流体セル、 $0 < F < 1$ のとき表面セルとして表現することが可能になり、セルを分類することができるが、この時点では表面セルとなるセルでの自由表面の向きは一意に決まっていない。そのため、表-1に示すような自由表面の向きを表すフラグ (frag) RF を定義し、どちら方向に流体が多く存在しているかを判断することにより表面セルでの自由表面の向きを決定する。

VOF関数 F の時系列計算は、SOLAスキームから計算された流速 u 、 w を用いて、donor-acceptor法により式(5)を解く(Hirt・Nichols, 1981)。donor-acceptor法は、移流により移動するVOF関数 F の値がdonor(風上側セル)とacceptor(風下側セル)の F の値によって決定される方法で、特に、風下側の自由表面形状と移流で運ばれる流体形状の連続性に注意して、VOF関数 F の値を決めるところに特徴がある。

自由表面形状は、表-1に示すフラグ RF によって表面セルにおける自由表面の方向が決定されているため、自由表面と平行な座標軸に対してVOF関数 F の値を用いた高さ関数を導入することにより計算することができる。

表-1 セル (i, k) の分類

RF	セルの状態	その内容
0	流体セル	セル全体が流体で満たされている
1	表面セル	表面が x 軸に垂直で、セル $(i-1, k)$ が流体セル
2	表面セル	表面が x 軸に垂直で、セル $(i+1, k)$ が流体セル
3	表面セル	表面が z 軸に垂直で、セル $(i, k-1)$ が流体セル
4	表面セル	表面が z 軸に垂直で、セル $(i, k+1)$ が流体セル
5	気体セル	セル全体が気体で満たされている
6	物体セル	物体を表す

2.4 境界条件

2.4.1 自由表面境界条件

(i) 流速の境界条件

流速の境界条件は、(1)表面に平行な流速の境界条件、(2)表面に垂直な流速の境界条件の2つに分類される。前者の場合、表面セルのフラグ RF が示した方向に流体があるため、流体が存在する方向のセル界面の流速を該当するセル界面に組み込むことにより境界処理を行う。後者の場合、VOF関数 F の移流計算するときに、表面セルでの連統方程式が満足するように値を決定する。これにより、VOF関数 F の移流計算の結果、表面位置が変化して表面セルが流体セルになるときでも、その流体セルにおいて連続性は保たれる。

(ii) 圧力の境界条件

一般に表面セルにおける圧力の定義位置は実際の自由表面の位置と異なるため、表面セルの圧力の定義位置とフラグ RF が示す流体セルの定義位置の2点間で圧力を線形近似することにより境界処理を行う。

2.4.2 その他の境界条件

本手法では、開境界条件として式(6)に示すSommerfeldの放射条件を、また、物体表面および底面の境界条件としてnon-slip条件を適用した。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 Q は流速 u 、 w などの物理量を、 C は波速を表す。

3. 造波ソースによる波の数値計算とその検証

3.1 計算条件

計算領域は、 x 、 z 方向にそれぞれ500、70 cmの範囲をとり、計算条件は、表-2に示すように、 x 、 z 方向のセル間隔 Δx 、 Δz をそれぞれ4.0、2.0 cm、初期時間ステップ間隔 Δt を0.01 s、静水深 h を50 cmとした。ただし、時間ステップ間隔 Δt は、式(7)に示すCourant条件を満足するように時間ステップごとに変化する。

$$\Delta t < \beta \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\Delta z}{|w|_{\max}} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $|u|_{\max}$ 、 $|w|_{\max}$ はそれぞれ x 、 z 方向における最大流速を表し、 β は重み係数で、本計算では0.5とした。

次に、本計算では、式(2)での造波ソース $q^*(z, t)$ の強さとして、Stokes波の第3次近似理論による水平方向流速 U を与えた。ただし、急に造波を行うと自由表面の

表-2 計算条件

Δx (cm)	Δz (cm)	Δt (s)	h (cm)
4.0	2.0	0.01	50.0

挙動が不安定になるため、式(8)に従い徐々に造波ソースの強さを上げていった。

$$q^*(z, t) = \begin{cases} \{1 - \exp(-0.5t/T)\} \cdot 2U : t/T \leq 3 \\ 2U : t/T > 3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 t は造波開始からの時間、 T は入射波周期である。また、式(8)の右辺が U の2倍になっているのは、波が x の正・負方向に進行することに対応している。

3.2 水面の時空間波形

図-2は、造波ソースの位置からそれぞれ120, 200, 300 cm離れた地点での波の時間波形 $\eta(t)$ を示したものである。計算条件として、入射波周期 T を1.0 s、入射波高 H を5.6 cmとしている。同図から、 $x=120, 200, 300$ cmの地点で、それぞれ造波開始から5周期目に安定した波形になっていることが分かる。また、計算値から求めた波長は154.1 cmであり、微小振幅波理論による波長151.1 cmより多少大きく、波の非線形性が認められる。図-3に示す空間波形 $\eta(x)$ についても、計算値(図中の実線)の最大値と最小値はそれぞれ0.58, -0.45で、波形が上下非対称となり、波峰が尖り波谷が平坦になるといった波の非線形性が確認できる。また、計算値は理論値(図中の○印)とよく一致している。

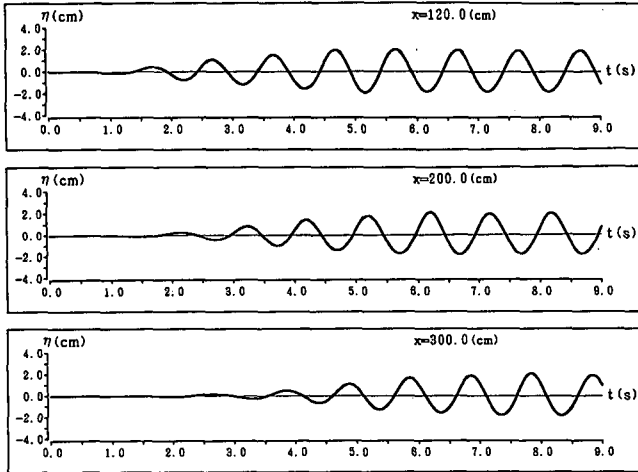


図-2 水面の時間波形 ($T=1.0$ s, $H=5.6$ cm)

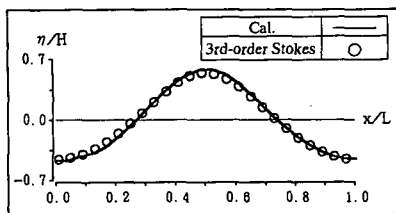


図-3 水面の空間波形 ($T=0.8$ s, $H=5.7$ cm)

今回は、造波ソースの強さとして Stokes 波の第3次近似理論による水平方向流速を与えたが、本手法では非線形不規則波を発生させることも可能で、一般性のある有効な方法であることを付記しておく。

4. 水理模型実験

名古屋大学の2次元鋼製水槽(長さ25×幅0.7×高さ0.95 m)を用いて、詳細な水理実験を行った。静水深 h は50 cmで一定に保ち、表-3に示すような規則波を造波させた。なお、構造物の模型の外寸は長さ68 cm、高さ34 cmで、潜水深を10 cmと固定した。それぞれの実験ケースに対して、水位変動 η を電気容量式水位計で、水平・鉛直方向流速 u, w を電磁流速計で同時に計測した。流速の計測に際しては、構造物から前後にそれぞれ4 cm間隔で計48地点、その各地点に対して水深方向に5 cm間隔で11地点測定を行い、構造物下部についても17地点、合計545地点の流速を詳細に計測した。

5. 水中構造物による砕波の数値解析

5.1 計算条件

本研究では、図-4に示すように2次元波動場に設置された、幅 W 、高さ D 、潜水深 d である水中構造物に対し、 x の負方向から波が入射する場合を考える。ここで、原点は静水面と造波ソースが交わる点で、 z 軸は鉛直上向きを正とする。また、 h は静水深を表す。

水中構造物による砕波の数値解析を行うにあたって、以上のパラメータは、水理実験と同様、 $W=68$ cm, $D=34$ cm, $d=10$ cm, $h=50$ cmである。

表-3 実験条件

Case	入射波周期 T (s)	波形勾配 H/L
Run 1	1.0	0.04
Run 2	1.0	0.03
Run 3	1.6	0.04
Run 4	1.6	0.03

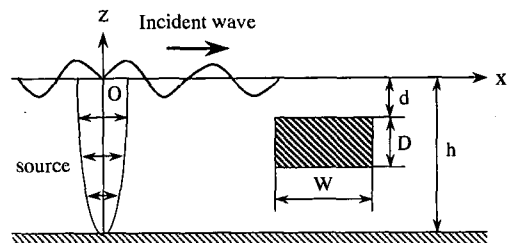


図-4 水中構造物の諸元

5.2 水面の空間波形と流速場

図-5(a)~(d)は、Run 1の場合で、造波開始から $t=7.55, 7.60, 7.72, 7.83$ s後の構造物周辺の空間波形と流速場を図示したものである。図-5(a)~(c)より、構造物上での波は波頭部が前傾して碎れるが、碎波後の波形はそれほど左右非対称でなく次第に波進行方向に崩れていくため、崩れ波碎波と巻き波碎波の中間型碎波が生じたと考えられる。また、水理実験からも同様な碎波形式が観察されており、本計算手法は碎波変形現象をよく再現しているものといえる。図-5(b)は碎波した波の波頭部が水面に突入したところを示したものであるが、碎波に伴って生じる気泡は認められない。これは、セル間隔 $\Delta x, \Delta z$ が気泡のサイズよりも大きいことに起因すると考えられる。図-5(c), (d)をみると、碎波した波が構造物上で2つに分裂し、波が再生していく様子が分かる。

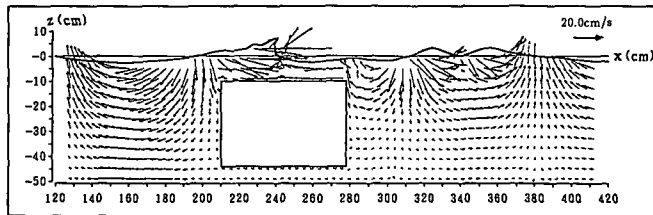
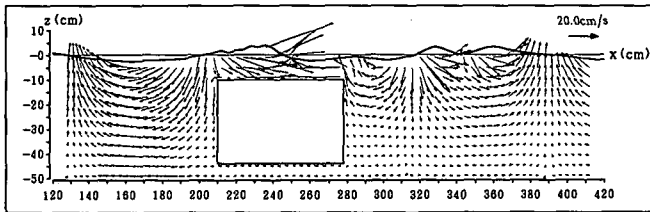
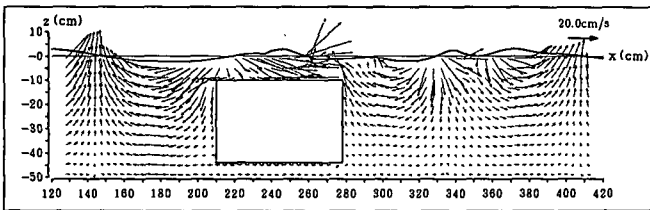
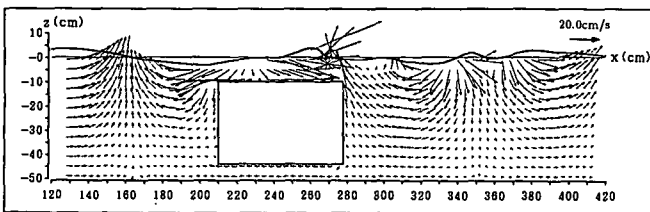
(a) $t=7.55$ s(b) $t=7.60$ s(c) $t=7.72$ s(d) $t=7.83$ s

図-5 構造物周辺の波動場と流速場の数値解析 (Run 1)

次に、図-5(a)~(d)から、構造物下部で戻り流れが卓越しているが、これは、波が構造物天端上で碎波し質量が岸向きに多く輸送されるため、それを補う流れが構造物下部で生じたものであり、Run 2~Run 4も同様な傾向を示した。

5.3 構造物背後での水面の時間波形

図-6(a)~(c)は、構造物背後から 12, 36, 60 cm離れた地点での水面の時間波形を無次元表示で表したものである。図中の実線は計算値、○印は実験値である。図-6(a)~(c)から、構造物上で水深が急に浅くなり波が強制的に碎波されるため、高周波数成分の波が発生し、碎波によって生じた高周波数成分波の波速の位相差により、水面の時間波形が大きく変動し、波峰が尖り波谷が広がるといった現象がみられる。また、波が進行するにつれて、波が分裂していくのが分かる。このような傾向は、Run 2~Run 4でも同様であった。

また、同図に例示するように、数値計算は、実験値とよく一致していることから、本手法は、碎波後までの水面波形の特性をかなりよく表現しうることが検証される。

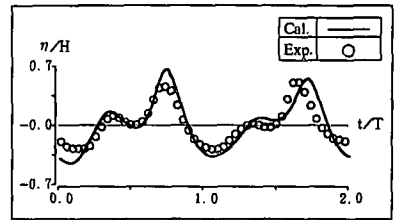
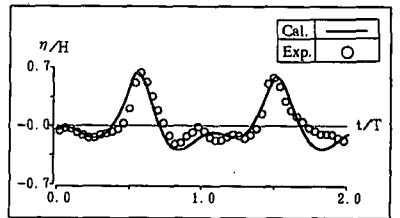
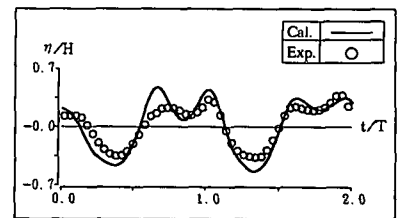
(a) 構造物背後から 12 cm の地点 ($x=290$ cm)(b) 構造物背後から 36 cm の地点 ($x=314$ cm)(c) 構造物背後から 60 cm の地点 ($x=338$ cm)

図-6 水面の時間波形の計算値と実験値の比較 (Run 1)

5.4 構造物周辺における平均水位の特性

本計算で求まる平均水位 $\bar{\eta}$ の空間変化の一例を図-7 に示す。図-7 に例示するように、計算値 (図中の実線) と実験値 (図中の○印) とともに構造物前面では平均水位が減少し、構造物背後では増大していることが認められる。このことは、radiation stress の変化に伴い、砕波点に向かって wave set-down, 砕波後は平均水深が上昇し wave set-up が生じるという従来の結果とよく一致している (Longuet-Higgins・Stewart, 1964)。

5.5 構造物周辺の定常流の特性

図-8 に例示するように、構造物前面近傍では、部分重複波の影響から鉛直上向きの定常流が卓越し、また、構造物背後では、天端上で砕波するため静水面付近で岸向きに強い定常流が認められるが、構造物背後から約 0.4 波長離れた地点 ($x=340$ cm 付近) では、鉛直下向きに定常流が生じている。底面付近の定常流は冲向きに卓越しているが、特に、構造物下部では、遊水域の通水断面が小さくなることによる縮流効果から、かなり大きい定常流が発生している。図-8(a) をみると、構造物天端上で冲向きの流れが卓越しているが、波谷より上の波面では、図示していないが数値解析から強い岸向き流れがあることを確認している。以上のことから、構造物まわりで循環流が生じると判断できる。なお、紙面の制約上図示していないが、他のケースについても同様な傾向を示した。

図-8(a), (b) より、計算値は実験値とよく一致していることから、本計算手法は構造物周辺の定常流の特性を十分に再現していることが分かる。

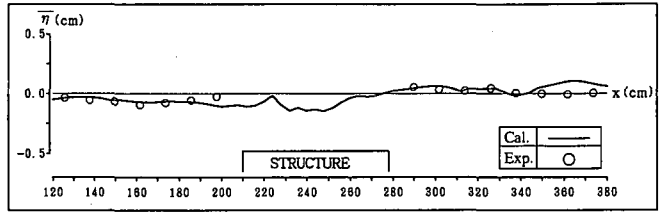
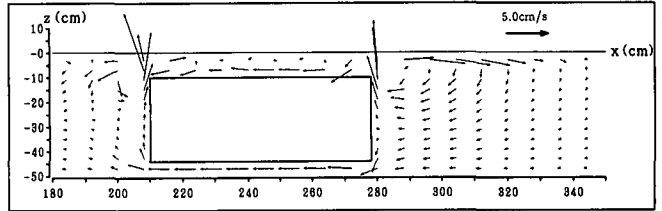
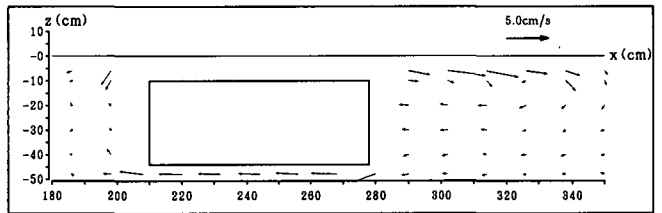


図-7 構造物周辺における平均水位の特性 (Run 2)



(a) 数値解析



(b) 水理実験

図-8 構造物周辺の定常流 (Run 2)

6. おわりに

本研究では、ソースによる造波方法と SOLA-VOF 法を組み合わせた数値解析手法を提案し、その手法を用いて水中構造物による砕波の数値解析を行い、その砕波特性を水理実験結果と比較しながら議論してきた。本論で提案した計算手法は、造波ソースの強さの与え方により非線形不規則波の造波も可能であること、また、計算値と実験値がよく一致していることもあわせて考えると、一般性のある精度高い手法といえる。

参考文献

川崎浩司 (1995): 水中構造物による砕波変形の数値解析, 名古屋

- 屋大学修士論文, 35 p.
- 酒井哲郎・水谷太作・田中秀明・多田幸夫 (1987): 斜面上の巻き波型砕波の砕波後の運動機構の数値解析, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
- 滝川 清・山田文彦・有元光久・田淵幹修 (1991): 斜面上の砕波変形過程の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 61-65.
- 朴 鍾千・宮田秀明 (1994): 有限差分法による 2 次元および 3 次元波崩れの数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 175 号, pp. 11-24.
- 正村憲史・藤間功司・林建二郎・重村利幸 (1991): 潜堤上の波の変形に関する数値解析, 土木学会第 46 回年次学術講演会 II-461, pp. 962-963.
- Brorsen, M. and J. Larsen (1987): Source generation of non-linear gravity waves with boundary integral equation method, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 93-113.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Jour. of Comp. Phys., Vol. 39, pp. 201-225.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964): Radiation stress in water waves, a physical discussion, with application, Deep Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562.