

## 数値計算による没水ケーソンの作用波力の評価 VOF法の耐波設計への適用性の検討

佐貫 宏\* 森屋 陽一\*  
関本 恒浩\*

### 要 旨

構造物周辺において碎波や渦が生じる条件では、構造物の作用波力特性に未知な部分が多く、そのような条件で従来の設計波力公式を適用した場合精度が問題となる。そうした場合、水理模型実験によって検討を行うが、実験準備からデータを得るまでに多大な費用と時間を費やすことになる。こうした検討手法におけるデメリットを解消するには、将来、容易で高精度な数値計算が検討手段として重要となると考えられる。そうした観点から、近年、自由表面の処理にVOF法を用いた非線形性の強い場にも適用性の高い数値計算手法が磯部ら(1999)によって開発されており、将来、水理模型実験に代わる設計波力評価手法として期待されている。本研究では、天端上で碎波などが起きやすい没水状態のケーソンに対して、水理模型実験の実施と数値波動水路の適用を試み、その適用性について検討を行った。ケーソン周辺における水位変動および作用波圧について比較検討を行った結果、数値波動水路では良好に実験結果を再現しており、VOF法の適用性の高さが確認できた。

### 1. はじめに

構造物周辺において碎波や渦が生じる条件では、構造物の作用波力特性に未知な部分が多く、従来の設計波力公式では精度が問題となる。このような場合、水理模型実験によって検討を行うが、模型の作成や斜面、計器の設置などの実験準備が容易でなく、データを得るまでに多くの費用と時間を費やすことになる。一方数値計算では水理模型実験のような手間はかからず、条件を入力すれば必要な水位、流速、圧力等を容易に計算することができる。しかしながら、波に関する数値計算には自由表面の処理などの問題点が多いため、構造物の耐波設計に数値計算はあまり活用されていないのが現状である。

自由表面を有する流れ場の計算手法としては、マーカー粒子を追跡するMAC法<sup>1)</sup>、Lagrange座標系によるALE法<sup>2)</sup>および境界適合座標法などがよく知られ、その他の計算手法についてもこれまで多くの研究がなされている。なかでも、Hirtら<sup>3)</sup>によるVOF(Volume of Fluid)法は、汎用性が高く非線形性の強い場にも適用性の高い数値計算手法である。

近年、このVOF法を用いた2次元水路内の場を高速且つ安定に計算するツールが磯部ら<sup>4)</sup>によって開発されており、数値波動水路と呼ばれている。数値波動水路は、波・流れ・地盤の相互作用について迅速かつ容易にシミュレートでき、従来の水理模型実験に代わる数値計算法として、将来構造物の耐波設計に適用できるものと期待されている。数値波動水路においては、現在、表-1に示すような従来水理模型実験で行われる項目に対して

適用した事例が数々報告されており<sup>4)</sup>、耐波設計への適用に向けて研究が進められている段階であるが、実用化には碎波の影響などの課題が残されている。

本研究では、没水状態のケーソンを題材として、ケーソン周辺の水位変動および作用波圧について、実験値とVOF法および線形理論を用いた境界積分方程式法による計算値を比較し、VOF法の耐波設計への適用性について検討を行った。

表 - 1 数値波動水路と水理模型実験

実験名	内容
入射波実験・透過波検定	浅水変形、碎波の程度、波の峰高さ、リーフでの変形
構造物の機能に関する実験	反射率・越波量・伝達波、透過波、海水交換
壁体構造物の安定性に関する実験	波圧・揚圧力(滑動、転倒、滑り、変形量など)
傾斜堤の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度(散乱・動揺・吸い出し・液状化など)
地盤の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度(液状化・洗掘・吸い出しなど)
海洋構造物の安定性に関する実験	流速・圧力・加速度(波力・係留力、動揺など)
その他	津波の遡上と津波力など

\* 技術研究所

2. 実験概要

2.1 実験方法

実験は、図 - 1 に示すように、長さ 50 m、幅 60 cm、深さ 1.2 m の二次元造波水路に、1/30 勾配の斜面に続き水平床を設置し、その水平床の前端にケーソン模型を据え付けて実施した。なお、実験縮尺は 1/60 を想定している。

水槽内の水位変動の測定には容量式波高計を用い、造波板側に 2 台、ケーソンの前面および背面よりおよそ 2 cm の距離にそれぞれ 1 台ずつ、さらにケーソン模型の後方に 2 台設置した。また、ケーソンに作用する波圧の測定には、超小型波圧計を用い、図 - 2 のようにケーソン模型の前面および背面に水路幅方向の中心線上にそれぞれ等間隔で 7 個ずつ配置した。

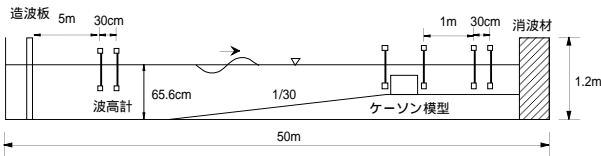


図 - 1 実験水槽概要図

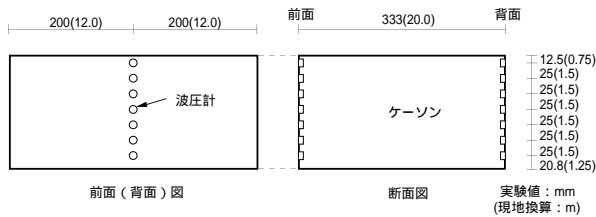


図 - 2 波圧計配置位置

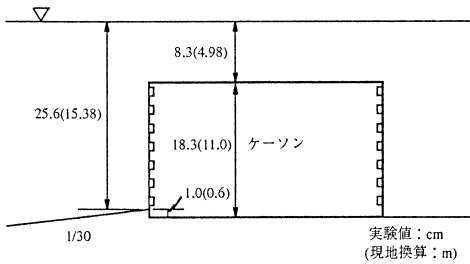


図 - 3 ケーソン模型設置状況

表 - 2 入射波条件

	実験室諸元	現地諸元
周期	1.03、1.29、1.55、 1.81、2.07 (s)	8、10、12、14、16 (s)
波高	6.7 (cm)	4.0 (m)

2.2 実験条件

本実験は、模型の設置条件は変えずに、周期の異なる規則波を作用させて、水位および波圧の測定を行った。図 - 3 は、ケーソン模型の設置状況を示したものである。かつこ内の数値は現地諸元を示している。ケーソン模型は、その前面位置と水平床前端位置が合うように設置した。なお、ケーソン模型の諸元については、ケーソン高さ 18.3cm、ケーソン幅 33.3cm、没水深さ 8.3cm、ケーソン前面水深 25.6cm である。

また、表 - 2 は実験に用いた規則波の入射波周期および入射波高の条件を示したもので、波高はケーソン前面位置での値を表している。ここでは、波高を 4m とし、周期を 8 ~ 16 秒 (現地換算) の間で 2 秒きざみに変えて波を作用させた。なお、水位と波圧データの収録は、両データとも収録周波数 200Hz とし、造波開始から 60 秒間測定を行った。

3. 計算方法

3.1 数値波動水路 (VOF 法)

数値波動水路について、磯部ら<sup>4)</sup>にしたがって、ここではその概略を示す。

3.1.1 基礎方程式

数値波動水路では、榊山ら<sup>5)</sup>のポラスボディモデルに基づき、以下に示す 2 次元非圧縮性流体の連続式および Navier-Stokes 方程式を基礎方程式としている。

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

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

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

ここで、 $x, z$  : 水平、鉛直座標、 $u, w$  : 流速の水平、鉛直成分、 $\rho$  : 密度、 $P$  : 圧力、 $\nu_e$  : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 $g$  : 重力加速度、 $\nu_e$  : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_z$  : 水平、鉛直方向面積透過率であり、CM を慣性力係数として  $\nu_e = \nu_e + (1 - \nu_e) C_M$ 、 $\gamma_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$

$\gamma_z = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M$  である。また、抵抗係数を  $C_D$  とし、抗力  $R_x$ 、 $R_z$  は以下のように流速の2乗に比例する形でモデル化している。

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

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (5)$$

また、乱流モデルには、実用性が高く様々な分野に適用されている高Re型k-ε 2方程式モデルを採用している。

### 3.1.2 自由表面の取り扱い

自由表面の取り扱いには、汎用性が高く複雑な自由表面が計算可能であるVOF法を採用している。VOF関数Fの移流方程式を以下に示す。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

### 3.1.3 計算条件

計算領域を図-4に示す。水平方向600m、鉛直方向28mの領域を考え、格子は水平方向に480分割 ( $\delta x = 1.25m$ )、鉛直方向に70分割 ( $\delta z = 0.4m$ ) した。また、水深は領域内で一様とし、実験で設定したケーソン前面水深15.38mを考慮して、計算格子サイズ上15.4mを用いた。さらに、沖の造波境界より300mの位置に高さ10.4m、幅20mのケーソンを設置しており、表-2の規則波を造波境界より入射させた。なお、計算時間は、コンピュータの性能とケーソン前後において安定した波が数波形成されるまでの時間を考慮していずれのケースとも80秒とした。

また、本計算では粘性とk-ε 2方程式モデルを考慮する。その際水(10℃)の動粘性係数を  $1.31 \times 10^{-6} (m^2/s)$  とし、k-ε 2方程式モデルについては乱流エネルギーと乱流エネルギー散逸の初期値として、それぞれ  $1.0 \times 10^{-20} (m^2/s^2)$ 、 $1.0 \times 10^{-20} (m^2/s^3)$  を用いた。

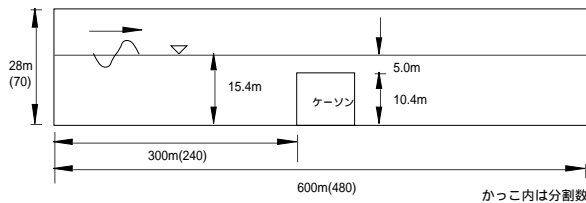


図-4 計算領域 (VOF法)

### 3.2 境界積分方程式法 (BIEM)

以下に境界積分方程式法<sup>6)</sup>の概略を示す。

まず、Laplaceの方程式に対する積分方程式は次式のように表される。

$$\frac{C}{2\pi} f(x, z) = \int_{\Gamma} \left[ f^* \frac{\partial f}{\partial n} - f \frac{\partial f^*}{\partial n} \right] ds \quad (7)$$

ここで、 $\Gamma$  は領域の境界、 $C$  は  $(x, z)$  における内部角、 $\frac{\partial}{\partial n}$  は境界外向き法線方向微分である。波の入射角を考慮した場合の  $f$  は、 $y$  軸を堤体法線方向にとり、 $f$  を速度ポテンシャルとして次式で定義される。

$$\Phi(x, y, z; t) = f(x, z) \exp[i(ky \sin \alpha - \sigma t)] \quad (8)$$

ここで、 $\alpha$  は入射角である。また、 $f^*$  は Helmholtz 方程式の Green 関数で以下ようになる。

$$f^* = \frac{1}{2\pi} K_0(kr \sin \alpha) \quad (9)$$

ここで、 $K_0$  は第2種0次変形 Bessel 関数である。

したがって、式(7)の積分方程式を(10)~(13)の境界条件のもとで解くことにより、ケーソン周辺の波の変形や作用波圧が計算できる。

水面における条件は、

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \frac{\sigma^2}{g} f \quad (10)$$

水底および堤体上では、

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

また、側面境界  $X^+$ 、 $X^-$  では、

$$f^+ = A_0^+ \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp(ikX^+ \cos \alpha) \quad (12)$$

$$f^- = A_0^- \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp(-ikX^- \cos \alpha) + f_i \quad (13)$$

ここで、 $f_i$  は入射波の速度ポテンシャル、 $A_0^\pm$  はそれぞれ伝達波および反射波の振幅を表す。なお、図-5にBIEM

で用いる計算領域を示すが、水深・ケーソンの諸元は図 - 4 と同様で、側面境界  $X^-$ 、 $X^+$  はケーソン中心位置より水深の 5 倍の距離に設定した。

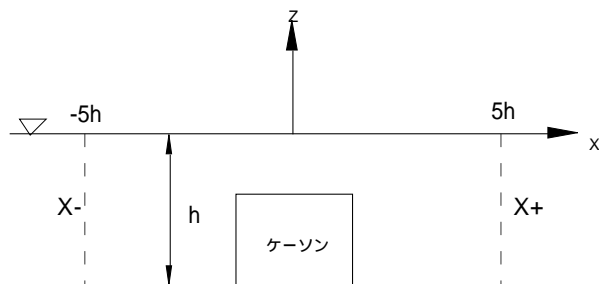


図 5 計算領域 (BIEM)

#### 4. 結果

##### 4.1 水位と波圧の時系列波形

まず、ケーソン前後における水位変動とケーソン前面および背面に作用する波圧について、実験値と計算値の比較を行った。

図 - 6 は、周期  $T=10(s)$  の規則波を用いたケースについて、ケーソン前後における水位の時系列波形を示したものである。VOF 法による計算では、時刻  $t=0(s)$  において沖から波を入射させているため、ケーソン設置位置における水位変動は徐々に大きくなり、およそ  $t=40(s)$  以降で安定した波が形成されている。なお、実験の波形は、ケーソン前面水位について計算値と位相が合うように時間をずらして表示してある。比較検討は、波が安定した時間帯について行う。ケーソン前面での水位変動について、実験では正弦的な波形が得られ、VOF 法と BIEM のいずれも実験値と良く一致した。一方、ケーソン背面での水位波形を見ると、非常に非線形性の強いとがった波形となったが、VOF 法による計算ではこれを良く再現している。なお、境界積分方程式法 (BIEM) は線形理論であるため、このような非線形性の強くなる場に対して再現性は低く、ケーソン背面水位においては位相のずれも生じている。

また、図 - 7 は、図 - 6 と同様に周期  $T=10(s)$  の規則波を用いたケースについて、ケーソン前面および背面のそれぞれ中心の波圧計位置における波圧の時系列波形を示したものである。ケーソン前後の水位波形と同様の傾向が波圧波形においてもみてとれ、VOF 法の計算結果は実験値と良く一致している。

##### 4.2 水平波圧合力と波圧分布

次に、ケーソン前面および背面において波圧値を積分し、水平波圧合力を計算して、水平波圧合力がピークを

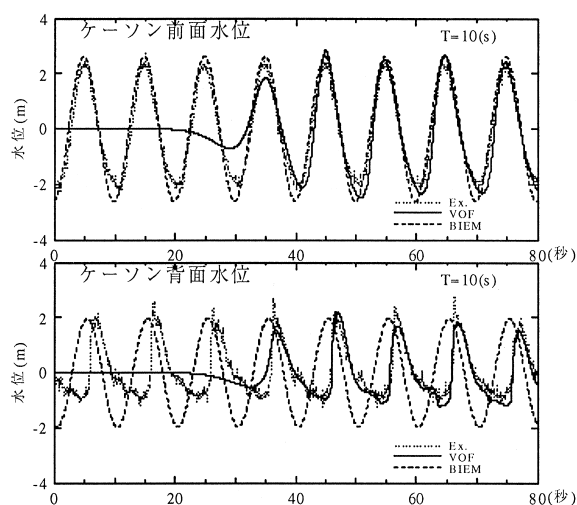


図 - 6 ケーソン前後の水位変動 ( $T=10s$ )

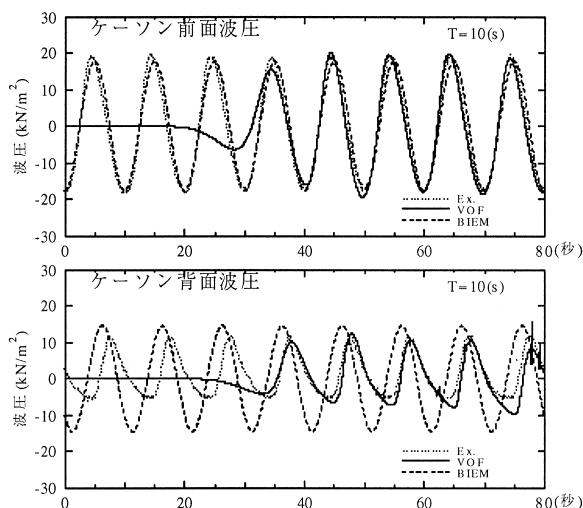


図 - 7 ケーソン前後の波圧時系列 ( $T=10s$ )

とるとき(押し波時と引き波時)の波圧分布を調べた。図 - 8 は、規則波の周期  $T=8 \sim 16(s)$  のすべてのケースについて、水平波圧合力の時系列波形を示したものである。振幅において実験値と計算値を比較すると、BIEM による計算値はいずれのケースにおいても過小評価となる。これは、実験では砕波の生じる入射波条件を用いたため、図 - 7 で示したようにケーソン背面波圧の計算再現性が低いことに起因する。

また、図 - 9、10 はそれぞれ押し波時および引き波時の波圧分布を示したものである。押し波時と引き波時いずれにおいても、VOF 法の精度の良さがみてとれる。一方、BIEM による計算結果は、いずれのタイミングにおいても精度が悪く、砕波の生じるような条件では適用が難しいことがわかる。



さらに、実験ではケーソン天端の波圧について測定を行っていないが、押し波時のVOF法による天端の波圧分布形状をみると、ケーソン前面位置よりもやや岸側で波圧が大きくなった。また、そのときのケーソン前面の波圧分布をみると、実験では天端に近いところで渦の影響と考えられる波圧の低減が見られたが、VOF法ではそれが計算結果によく現れている。

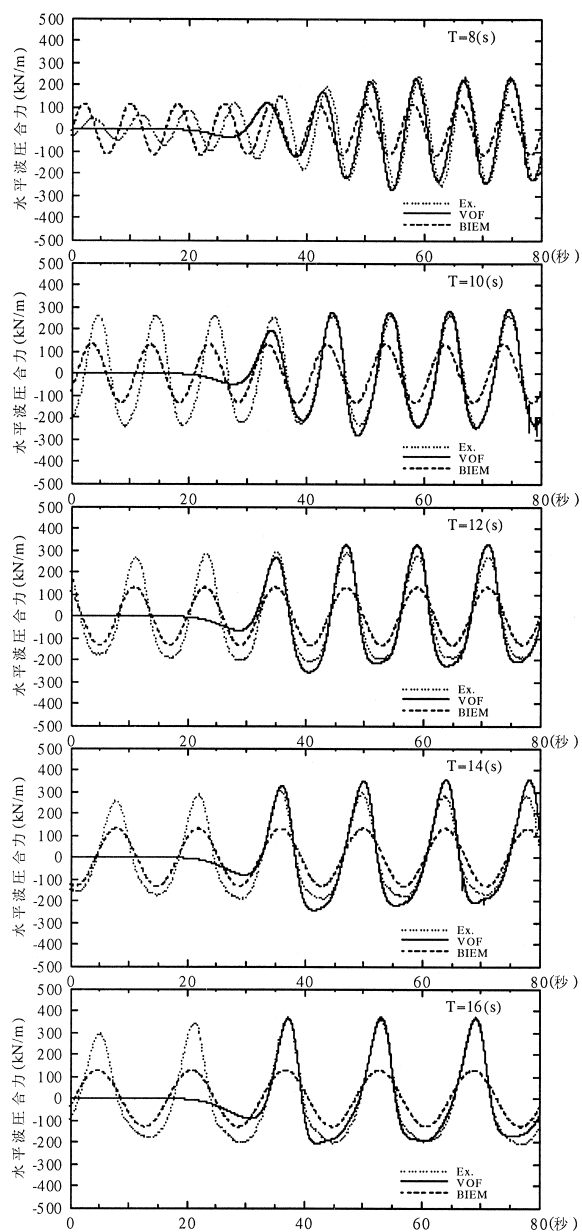


図 - 8 水平波圧合力の時系列波形

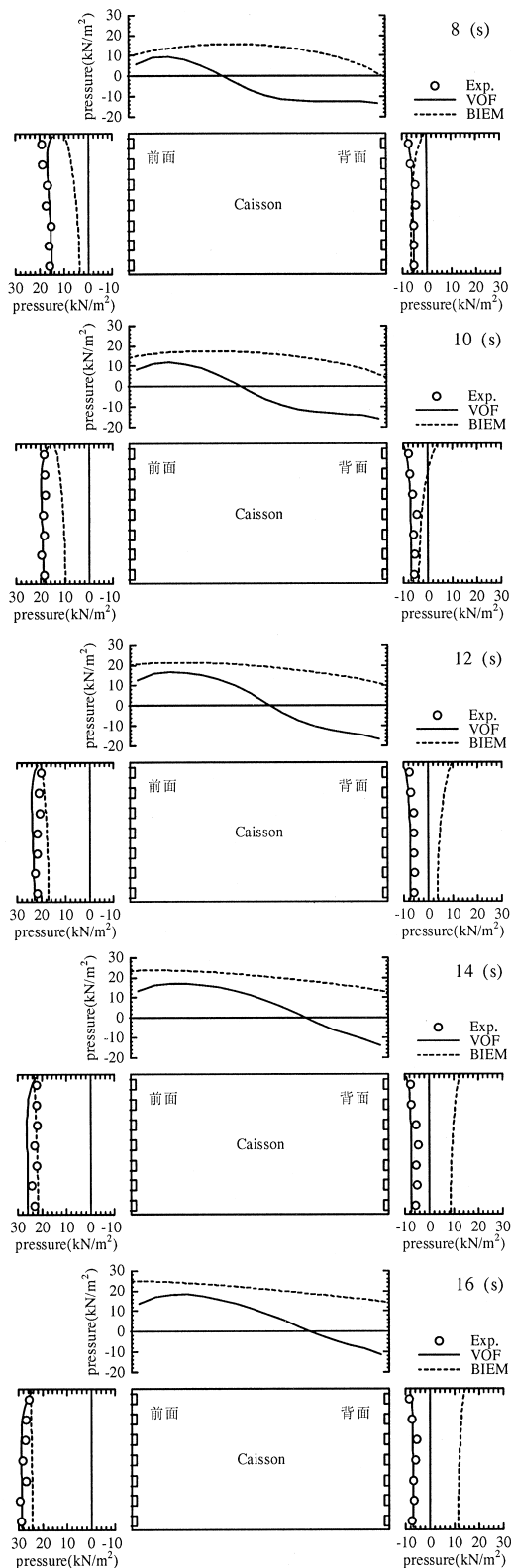


図 - 9 水平波圧合力最大時（押し波時）の波圧分布

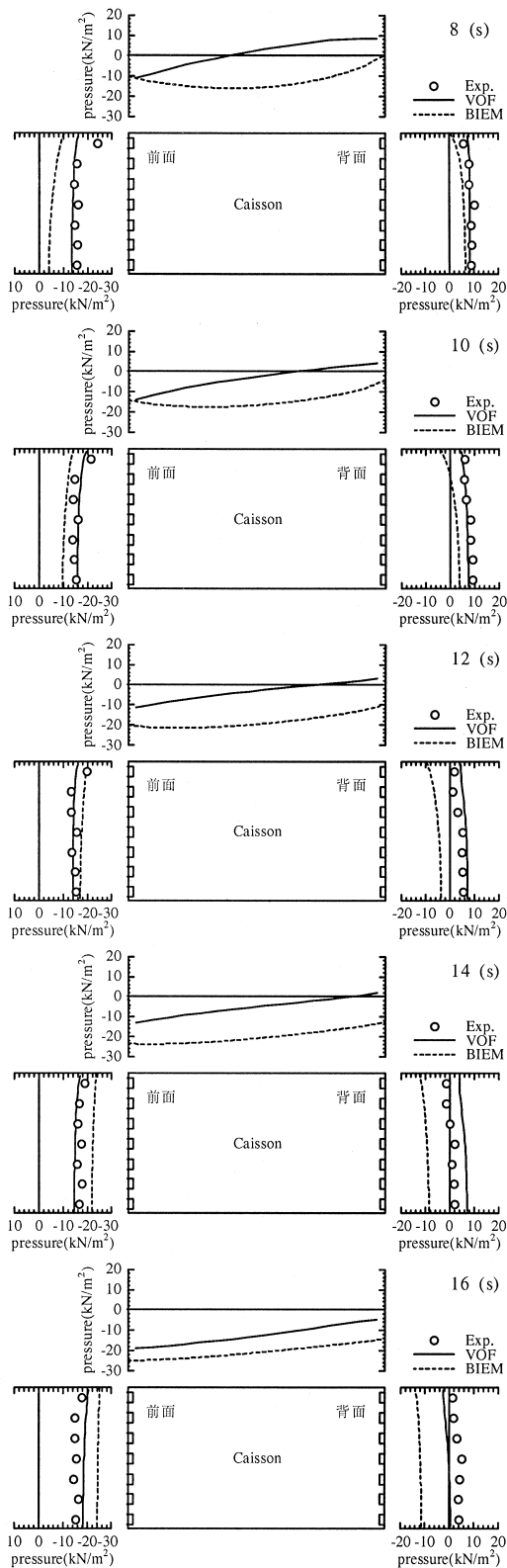


図 - 10 水平波圧合力最小時（引き波時）の波圧分布

5 . おわりに

本研究では、将来構造物の耐波設計の適用が期待されている数値波動水路を用いて、没水ケーソン周辺の波の変形や作用波圧の評価を行った。実験値との比較を行った結果、ケーソン前面の正弦的な水位や波圧波形だけでなく、非線形性の強いケーソン背面におけるとがった波形もVOF法を用いた数値波動水路では良く再現されており、数値波動水路の再現性の高さが確認された。

なお、本検討結果より数値波動水路を耐波設計に活用することで、種々の形式の構造物に対してもそれらと波との相互干渉について、精度の高い検討が行えることが期待される。

謝 辞

最後に、本研究で用いた数値波動水路プログラムは、数値波動水路研究会（代表：東京大学教授磯部雅彦）会員の御協力のもと開発されたもので、現在耐波設計への適用に向けて改良・拡張中である。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1 ) Harlow, F.H. and J.E. Welch : Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Physics of Fluid, Vol.8, No.12, pp.2182-2189, 1965
- 2 ) Hirt, C.W. , A.Amsden and J.Cook : An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds, J.comp.Phys. , Vol.14, pp.227-253, 1972
- 3 ) Hirt, C.W. and B.D.Nichols : Volume of Fluid(VOF) method for dynamics of free boundaries, J. of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225, 1981
- 4 ) 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：数値波動水路の耐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、第15巻、pp.321-326、1999
- 5 ) 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
- 6 ) 関本恒浩・近藤浩右・大下哲則・今井澄雄・中村光宏：入射角を考慮したカーテンウォール式防波堤の設計波力について、第35回海岸工学講演会論文集、pp.657-661、1988