

水面上の構造物に働く波浪衝撃圧の研究

九州大学大学院総理工 学生員○杉山 晋 正会員 経塚 雄策

1 はじめに

近年、沿岸域において多彩な構造物が建設されているが、海洋構造物が水面上に隣接している場合には、そのプラットホーム部分に波浪衝撃を受ける場合がある。その際に受ける衝撃を予測することは、海洋構造物を設計する際に重要なことになる。しかし、非線形な波と構造物の相互作用を解析的に近似、予測することは極めて難しく、また全てを実験で取り扱うにも限界がある。もっとも有効な解析手段として数値解析があるが、その有効性を確かめるにはその他の解析結果や実験結果との比較が不可欠である。

そこで本研究では、非線形波として孤立波を取り上げ、孤立波が水面上に近接して置かれた矩形構造物と衝突する場合を想定し、孤立波と矩形構造物の相互作用について数値解析及び模型実験を行ない、結果を比較することで数値解析の精度や妥当性を評価し有効性を考察する。

2 数値計算

計算は2次元、非圧縮と仮定し、以下に2次元の連続の式と Navier-Stokes 式を基礎方程式とした。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Navier-Stokes 式の離散化は、移流項については非保存形表示で以下に示す中心差分と1次風上差分の混合スキームを使用した。 α は1次風上差分の重みを表している。

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}}{\delta x_\alpha} \left\{ \delta x_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} + \delta x_{i+1} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} + \alpha \operatorname{sgn} \left(u_{i+\frac{1}{2},j} \right) \left[\delta x_{i+1} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} - \delta x_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} \right] \right\}$$

$$\delta x_\alpha = \delta x_i + \delta x_{i+1} + \alpha \operatorname{sgn} \left(u_{i+\frac{1}{2},j} \right) (\delta x_{i+1} - \delta x_i)$$

他の項は陽的な中心差分で離散化した。また自由表面の取り扱いには VOF 法を使用した。VOF 法は、計算セル内の流体量を流体の占める割合で表すことで、自由表面を識別する。つまり、関数 F を計算セル内の流体の占める割合とすれば、 $F=1$ ではセルは流体で満たされていて、 $F=0$ では、セル内に流体は存在していない。 $0 < F < 1$ では、セルが自由表面を含んでいる。この F の基礎方程式は、

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

となる。計算の手順は、タイムステップ毎に流速を(1)(2)式で陽的に計算し、求めた流速を連続の式(3)式を満たすように、セル毎に圧力と流速を反復調節する(SOLA法)。流速が決定された後で、(4)式を使用して新しい自由表面

を計算する。自由表面条件については、VOF法の自由表面条件は連続の式であり、動力学的な条件としては、自由表面上で圧力が0となるように自由表面を含むセルに対し適切な圧力を外挿して与えた。他の境界条件については、海底と構造物表面を滑べりなしとした。表面張力は考慮していない。

数値計算において孤立波は以下に示した波高、流速の式を使い初期条件で与えた。

$$\begin{aligned} \eta(x,t) &= H \operatorname{sech}^2 \phi_0 \\ u(x,t) &= H \operatorname{sech}^2 \phi_0 \\ v(x,t) &= \sqrt{3H^3}(1+y) \operatorname{sech}^2 \phi_0 \tanh \phi_0 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、ここで $\phi_0 = 1/2\sqrt{3}H(x-Ct)$ で、 H は波高、 $C = \sqrt{1+H}$ は波の速度である。ただしこれらの式は参考速度 $\sqrt{gd}$ 、参考長さ d で無次元化された式である。

3 実験装置及び方法

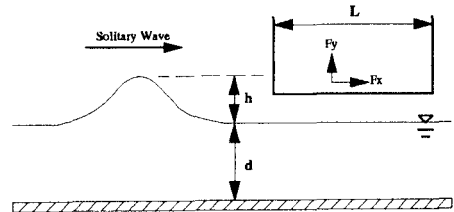


図-1 実験概略

実験には、長さ16 m、高さ0.6 m、幅0.3 mの2次元水槽内でピストン式造波機を用い孤立波を造波した。水路中央付近に、矩形模型 ($L=0.25$ m) を水槽底から高さ0.15 cmの位置に固定した。模型の高さは、孤立波が衝突時に模型を越えないよう十分にとった。水深 d は0.12 mから0.17 mまで0.01 m毎で6種類とり、水深 d が0.15 m以上では矩形模型下部が水面下に没した状態となる。造波した孤立波の波高は水深 d により異なるが、 $h/d=0.25$ 程度だった。実験では、孤立波が矩形模型と衝突し水面が模型から完全に離れるまでの、模型の底面での衝撃圧、模型が受ける波力、模型まわりの水面変移を計測した。圧力について図-2に示した矩形模型底部で2箇所、力は3分力計(5.0 kg)で矩形模型にかかる鉛直及び水平方向成分を、また矩形模型横の水面変移は模型に近接して設置した2つの波高計でサンプリング周波数1.0 kHzで計測した。

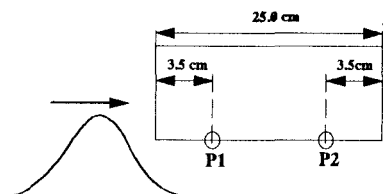


図-2 圧力計測点

4 計算結果

水深が $d = 0.13\text{m}$ の場合の実験結果と数値解析結果について示す。ここで、孤立波の波高 h は $h/d = 0.277$ である。結果は、圧力は $p_0 = \rho g d$ 、力は $F_0 = P_0 S$ で無次元化してある。ここで S は構造物底面積とした。

図-3は、計算から求めた構造物まわりの流速ベクトルと自由表面形状である。およそ $T = 2.5$ で圧力、力がピークに達する。 $T = 3.5$ では、構造物右壁付近の水面近くで流速が大きくなっている。一方、図-4の実験のビデオ撮影画像でも同様の位置で激しい自由表面の動きが確認できる。

図-5には圧力の結果を示す。P1では計算値と実験値がほぼ一致している、P2では計算値が実験値と比べピーク時の値で小さいものの、概して良好な結果である。

図-6は波力についての結果である。Y方向の力については殆ど実験と計算の値が一致している。X方向の力については計算値が実験値の半分程度となったが、X方向に働く力自体がY方向に働く力と比べ比較的小さいので問題ではない。圧力と同様に波力についても良好な結果が得られた。

以上の圧力、波力などに関して得られた計算と実験の結果を比較すると、孤立波と水面上の構造物の相互作用について数値解析の有効性が確認できた。

参考文献

- [1] M.D.Torrey, L.D.Cloutman, R.C.Mjolsness and C.W.Hirt "NASA-VOF2D:A Computer Program for Incompressible Flows with Free Surface" Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-10612-MS, Dec 1985.
- [2] B.D.Nichols, C.W.Hirt and R.S.Hotchkiss "SOLA-VOF:A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries" Los Alamos Scientific Laboratory report, LA-8355, Aug 1980.

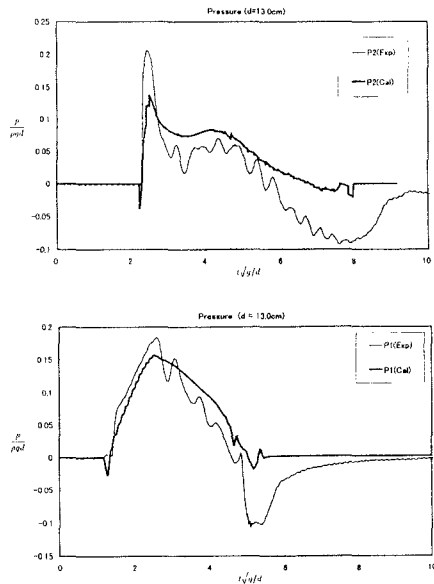


図-5 圧力の時系列 (Exp & Cal)

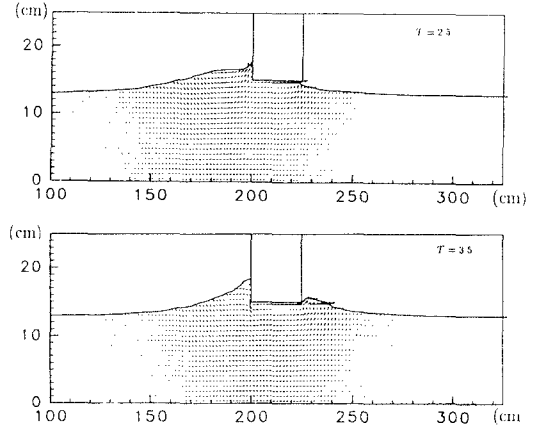


図-3 構造物まわりの自由表面と流速ベクトル (Cal)

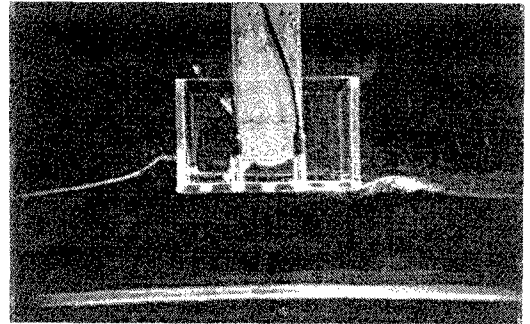


図-4 ビデオ撮影画像

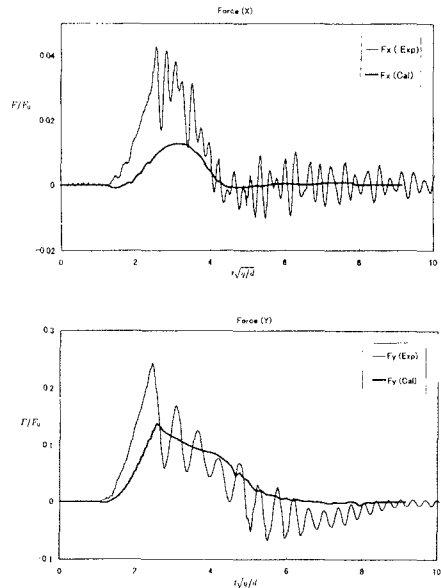


図-6 波力の時系列 (Exp & Cal)