

構造物の移動を考慮した VOF 法に基づく数値波動水路の構築

名古屋大学大学院工学研究科 正会員 川崎浩司
 名古屋大学工学部 学生会員 ○島 知宏

1. はじめに

海域の環境と利用に配慮した高潮防潮堤の一つとして、フラップゲート型高潮防潮堤が現在検討されている。その特徴としては、通常時は海底面に格納することで景観や海水交換性に優れ、一方、高潮等の高波浪時にはゲートを立ち上げるにより港内側を防護できることなどが挙げられる。川崎ら(2003)は、数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure) の構造物形状入力方法を改良することにより、静止状態のフラップゲート型高潮防潮堤に作用する波圧を精度よく解析した。しかしながら、フラップゲート型高潮防潮堤の動的挙動を考慮していないため、検討の余地が多く残されている。さらに、現在の数値波動水路 CADMAS-SURF では、フラップゲート型高潮防潮堤のように移動する構造物と流体の相互干渉を解析することは不可能である。以上のことから、本研究では、構造物の動的挙動を考慮した VOF 法に基づく数値波動水路の構築を目的とする。また、構造物と流体の相互干渉問題の一つとして構造物の水平移動を取り上げ、構造物の移動に伴う水位変動および水粒子速度場について検討する。

2. 数値波動水路の概要

数値波動水路 CADMAS-SURF は自由表面が多価関数となる複雑な水理現象を高精度解析できる VOF (Volume Of Fluid) 法に基づく鉛直 2 次元数値波動水路である。基礎方程式は、透過性構造物の空隙率、流体抵抗を導入した Porous Body Model に基づいて拡張した非圧縮粘性流体に対する連続式(1), x, z 方向の Navier-Stokes 運動方程式(2), (3), 流体の体積率を表す VOF 関数 F の保存式(4)から構成されている。なお, $F=0, F=1, 0 < F < 1$ はそれぞれ気体セル, 流体セル, 表面セルを示す。また、式中の記号の定義は財団法人沿岸開発技術研究センター(2001)を参照されたい。構造物の動的挙動を考慮できるように数値波動水路 CADMAS-SURF をつぎのように改良した。まず、図-1 に示すように、任意形状構造物の設定を行うとともに、各セルの状態を「構造物セル」、構造物が一部占有する「ポーラスセル」、それら以外の「その他セル」に分け、各ポーラスセルに対して体積・面積空隙率を算定した。なお、上述の計算後、VOF 関数の値により、「その他セル」を「流体セル」、「表面セル」、「気体セル」に分類することができる。つぎに、構造物境界面と内部に構造物の移動速度を設定することにより、Donor-Acceptor 法を用いて構造物と流体の動的挙動を同時解析できるようにした。以上の計算過程を時間ステップ毎に実施し、構造物の移動に伴う流体解析を行った。

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

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_c \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_c \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \tag{2}$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_c \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_c \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_g \tag{3}$$

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_f \tag{4}$$

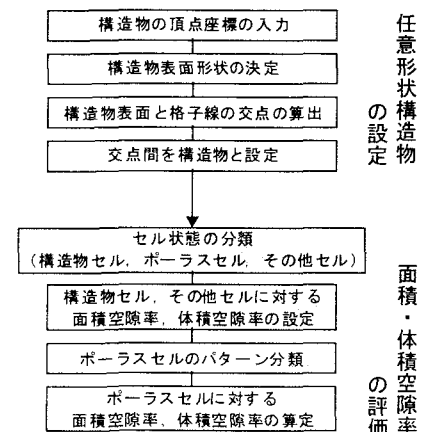


図-1 任意形状構造物の設定方法

3. 計算結果と考察

図-2は構造物の移動に伴う水位変動と水粒子速度場の時系列変化を同時に示している。同図に示すように、計算領域は50.0m×10.0mであり、静水深 h を5.0mとした。(a)と(b)は構造物が底面に接している場合と浮いている場合であり、構造物幅を8.0m、構造物高さをそれぞれ6.0m、4.0mとした。また、構造物の移動速度は計算領域右方向に3.0m/sとし、 x 方向と z 方向のメッシュ間隔をともに0.5mとした。図-2(a)と(b)の両図から、構造物が水平移動し始めると、構造物前面の水位が上昇し、そして構造物上に水塊が遡上していく様子が認められる。一方、構造物背後では水位が低下している。図-2(b)では、構造物下部に有水域が存在するため、時計回りの循環流が形成されている。また、両図から、構造物左端が $x=21.0\text{m}$ から $x=27.0\text{m}$ に移動しており、このことは計算時間2.0sにおける構造物の理論的移動距離6.0m(=移動速度3.0m/s×計算時間2.0s)と完全に合致している。なお、紙面の関係上図示しないが、構造物を左方向に同じ速度で移動させたところ、計算結果は図-2と図-3の結果と全く対称であり、計算手法に方向依存性がないことも確認している。

4. おわりに

本研究では、構造物の動的挙動を考慮したVOF法に基づく数値波動水路を構築し、構造物の水平移動に伴う水位変動と流速場の計算結果から本モデルの有用性を確認した。今後は、構造物の回転運動も解析可能な数値波動水路を構築し、フラップゲート型防潮堤の越波と作用波力などの諸特性を解明していく所存である。

[参考文献]

川崎浩司・富田孝史・下迫健一郎・高野忠志・熱田浩史(2003)：フラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力，海岸工学論文集，第50巻，pp.791-795。

財団法人沿岸開発技術研究センター(2001)：沿岸開発技術ライブラリーNo.12 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発～数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書～，457p。

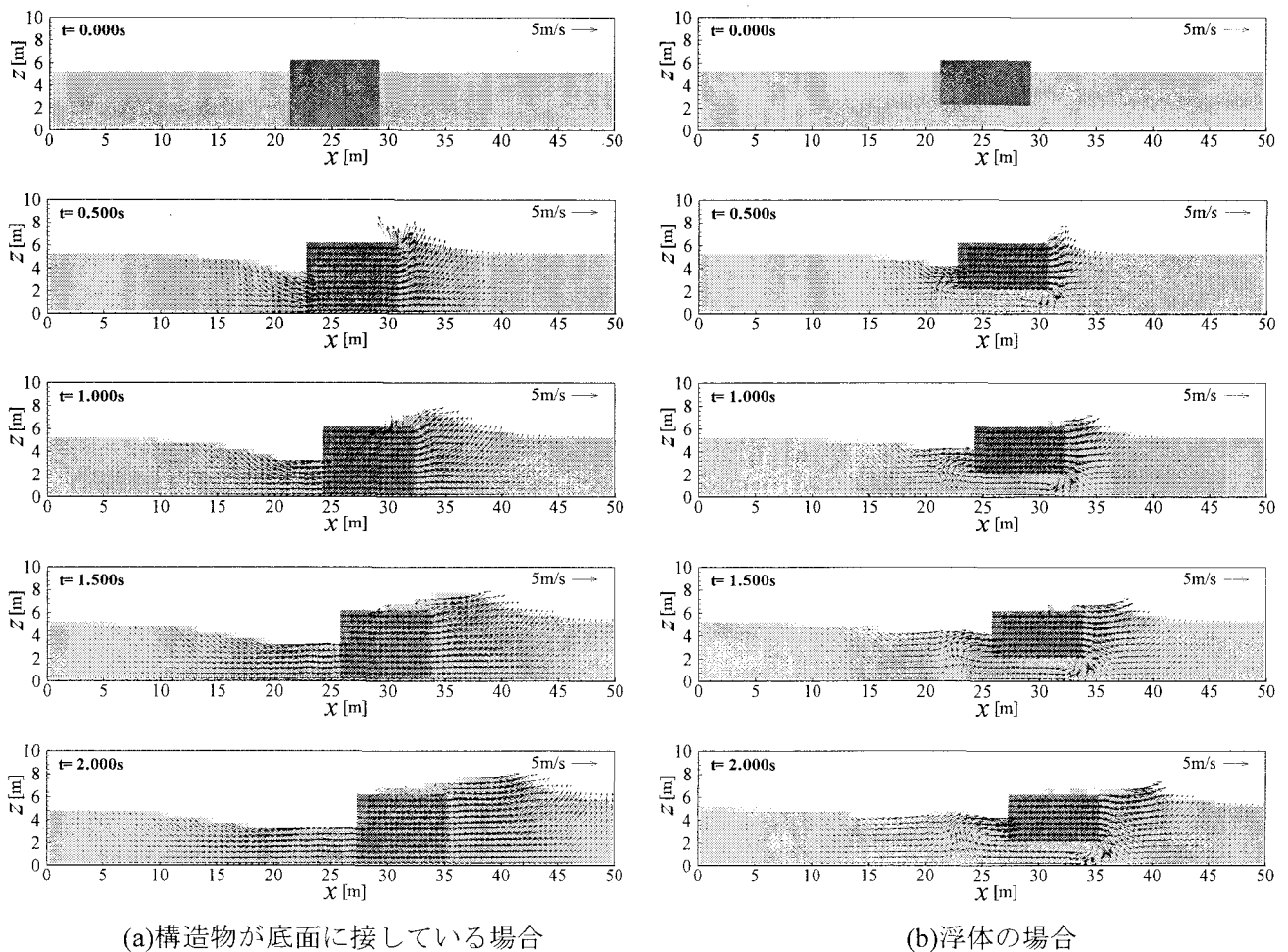


図-2 構造物の移動に伴う水位変動および水粒子速度場