

第II部門 大型水中振動台上に置かれた構造物周りの流れに関する数値シミュレーション

京都大学大学院 学生員 ○正谷 優弥 京都大学大学院 正会員 音田 慎一郎
 京都大学大学院 学生員 Qiyun PANG 五洋建設株式会社 正会員 吉田 誠
 五洋建設株式会社 正会員 白 可 五洋建設株式会社 正会員 宇野 州彦

1. はじめに

構造物周りの水の流れを精度よく予測することは、構造物の安定性を検討する上で重要である。構造物周りの流れ場として、橋脚周りの河床変動やスロッシングなど挙げられるが、こうした現象については水面に沿って座標系を設定した移動一般座標系での数値シミュレーションが行われている(例えば Nagata ら¹⁾)。本研究では、大型水中振動台上を振動する円柱構造物周りの流れ場に注目し、移動一般座標系を用いて3次元数値流体解析を行い、既往の実験結果と比較することで数値解析モデルの妥当性を検証することを目的とする。

2. 数値解析モデル

(1) 流体解析モデル

流れのモデルには、木村らによって提案された3次元流体解析モデルを適用する²⁾。格子の移動を考慮した移動一般座標系における連続式および運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^i \sqrt{g}}{\partial \xi^i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^i (V^j - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j [-\overline{v^i v^j}] + 2\nu \nabla_j S^{ij} \quad (2)$$

$$S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j \quad (3)$$

ここに、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^i : 計算空間における流速ベクトルの反変成分、 g_{ij} : 基本計量テンソル、 $g = \det[g_{ij}]$ 、 $g^{ij} = (g_{ij})^{-1}$ 、 p : 圧力、 v^i : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 ν : 動粘性係数、 ρ : 流体の密度、 W^i : 格子の移動速度の反変成分、 F^i : 重力加速度ベクトルの反変成分、 S^{ij} : 変形速度テンソルである。また、乱流モデルには、2次の非線形 $k-\varepsilon$ モデルを採用した。

(2) 数値解析法

本解析の計算手法について説明する。水理量の配置には完全スタガード格子を用いる。時間進行は完全に陽解

法であり、基礎式の離散化には移動一般座標系における有限体積法を適用する。運動方程式の移流項の離散化には二次精度の QUICK スキームを、 k, ε 方程式の移流項の離散化には Hybrid 法を適用する。圧力は一般曲線座標系に拡張した SOLA アルゴリズムを用いて各時間ステップで収束的に求める。また、壁面及び底面の境界条件には壁関数法を用い、壁面の抵抗は対数則で評価する。

3. 実験への適用

(1) 実験条件及び計算条件

上記のモデルを、京都大学と五洋建設株式会社で実施されている共同研究の一環として実施された大型水中振動台実験の一部に適用する。実験には、15(m)×15(m)の水槽の底に直径 5.5(m)の振動台テーブルが設置された水中振動台を用いた。水深は 1.75(m)とし、テーブル上に直径 0.425(m)、高さ 5.75(m)の円柱構造物を設置した。実験では、テーブルに一方方向の正弦波を与えることで、強制的に円柱構造物を振動させた。計測に用いた波高計、流速計の位置を図 1 に示す。

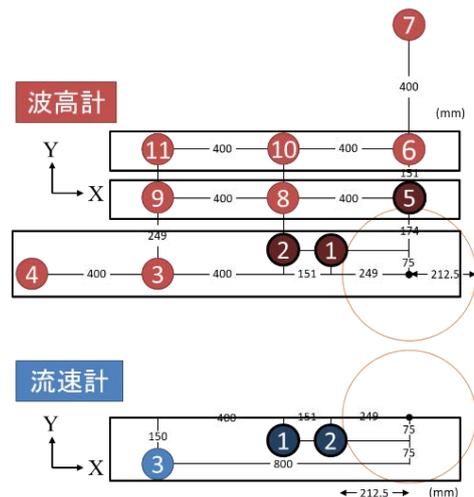


図 1 波高計・流速計の位置

本解析における計算領域を図 2 に示す。計算領域は水槽内の構造物周辺を対象とした。水平面内における構造物付近の計算格子の初期配置を図 3 に示す。初期の格子

幅は、 Δz を等間隔とした一方で、格子数を減らすために Δx , Δy は構造物の近くでは小さく、構造物から離れるにつれて大きくした。また、計算を簡単にするため、円柱構造物は直交格子で疑似的に表現した。計算格子数は、振動方向に 160 メッシュ、奥行き方向に 70 メッシュ、鉛直方向に 25 メッシュとした。振動方向の格子移動については、実験のテーブル変位をもとに、振幅 0.0065 (m)、振動数 2 (Hz) の正弦波の変位を与えた。一方で、鉛直方向の格子移動については、水深の時間変化に応じて底面から水面までを等分するように更新した。

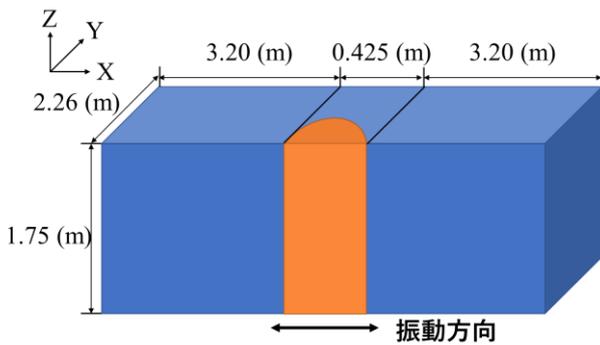


図 2 計算領域

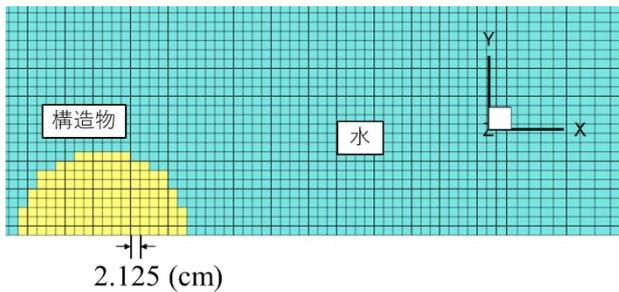


図 3 水平面内における構造物付近の計算格子

(2) 計算結果

計算結果として、 $t=3.0$ (s)における水面形を図 4 に示す。構造物の振動により波が発生し、伝搬する様子を再現できていることが分かる。

波高計、流速計の計測データと計算結果について、テーブルの振動変位を同じにして比較したものを図 5 に示す。構造物から近い領域では、水面変動は振幅・位相ともに概ね一致している。また、実験結果と同じように、円柱から遠くなるにつれて、水面変動が小さくなること分かる。流速についても振幅・位相ともに概ね一致しているが、奥行き方向 (y 方向) の流速は実験よりも小さくなった。この点については今後の検討課題としたい。

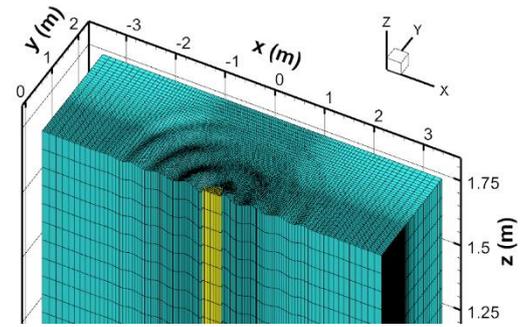


図 4 数値解析による水面形 ($t=3.0$ (s))

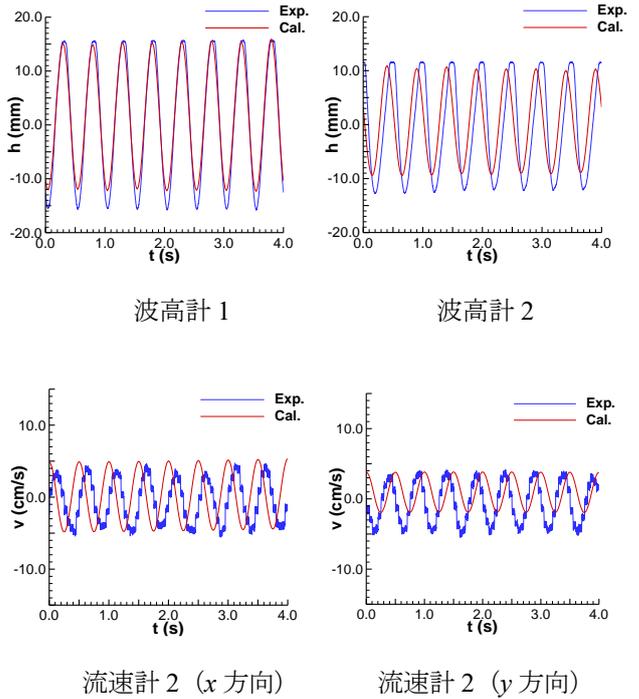


図 5 水面変動・流速の時間変化

4. まとめ

本研究では、移動一般座標系を用いた 3 次元流体解析モデルを大型水中振動台実験に適用し、振動する円柱構造物周りの水の流れについて数値シミュレーションを行った。その結果、振動する構造物周辺の水面変動の振幅・位相をある程度再現することができた。今後は円柱構造物を正確に表現できる曲線格子を用いた計算や異なる形状の構造物を対象とした計算に取り組みたい。

参考文献

- 1) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y. : Three-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Hydraulic Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, pp. 1074-1087, 2005.
- 2) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎 : 完全スタガード移動一般曲線座標系における三次元開水路乱流シミュレータの開発, 四日市大学環境情報論集, No. 5, pp. 145-170, 2002.