

第II部門 スロッシング発生時に傾斜板群に作用する流体力に関する研究

大阪市立大学大学院工学研究科 学生員 田邊 礼佳
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 重松 孝昌
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 中條 壮大

1. 研究背景・目的

2011年東北地方太平洋沖地震では茨城県鰐川浄水場において、沈殿池に設置されている沈降促進のための傾斜板が落下・変形する被害があり、水供給が長期間にわたって停止した¹⁾。被災原因はスロッシングと考えられているが、その被災メカニズムの詳細は未解明である。

今後、海溝型地震や活断層型地震などの巨大地震が非常に高い確率で発生すると予想されており、沈殿池傾斜板の被害抑制対策は急務であると言える。本研究では、傾斜板の被災メカニズムを解明するために、スロッシング発生時に傾斜板群に作用する流体力及びその周辺流況について2次元数値モデルを用いて検討する。

2. 数値モデル

複数の板から成る構造物表面の境界条件を厳密に満足させて流体計算を行うことは難しい。本研究では Immersed Boundary Method (IB法)²⁾を適用する。IB法では、直角格子状に分割された計算領域内に、物体表面上に定義される Lagrange 点を設定し、Lagrange 点上で境界条件を満足するように強制外力を求め、この強制外力の反作用力を外力として流体計算を行う。

非圧縮性・粘性流体を対象とした流体の基礎方程式は Navier-Stokes 式と連続の式である。

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{g} + \vec{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 \vec{V} は速度ベクトル、 P は圧力、 t は時間、 μ は粘性係数である。 \vec{g} は外力ベクトルで、振動外力に相当する加速度を含んでいる。また、 \vec{F} は、流体-物体間の相互作用力を表す強制外力項である。この項は先に述べた Lagrange 点上の強制外力を直角格子上に分配した値である。本数値モデルでは以上の基礎方程式を解いてスタガード格子上に定義された流速や圧力を求め、流体の挙動を計算した。水面形状の追跡には VOF 法³⁾を用いた。

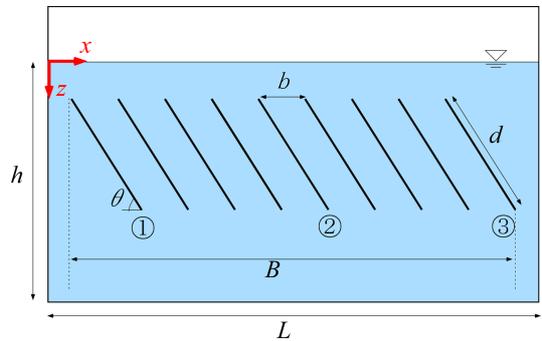


図-1 傾斜板設置条件

表-1 計算条件

| θ [°] | d [m] | h [m] | L [m] | T [s] | α [m/s ²] | μ [Pa·s] |
|--------------|---------|---------|---------|---------|------------------------------|----------------------|
| 60 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.72 | 0.0050 | 1.0×10^{-3} |

3. 計算条件と計算結果

式-(3) で与えられる振動外力に相当する加速度を流体に与え、スロッシング発生時に水面変動や傾斜板に作用する流体力を計算した。

$$\alpha = a \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = \alpha_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (3)$$

ここに、 a は振動振幅、 T は水槽幅 L と水深 h で決定される容器の固有周期である。計算条件を図-1、表-1 に示す。本研究で対象とする現象を支配する要因は、水深 h 、水槽幅 L 、傾斜板の設置幅 B 、長さ d 、設置間隔 b 、及び加速度 α とその周期 T である。本研究では $B/L=0.89$ で一定とし、 $b/L=0.031, 0.062, 0.093$ と変化させて計算を行った。壁面及び水底の境界条件には non-slip 条件を課した。

図-2 に水槽の左右端、中央での水面変動 η/h の時系列変化を示す。図-2 より、水槽の中央ではいずれの条件においても水面変動が非常に小さいが、水槽の左右端では b/L が小さいほど水面変動が小さくなること分かる。すなわち、傾斜板の設置間隔が小さく枚数が多くなるとスロッシングは減衰するが、スロッシングのモードは変化しないことが分かる。

次に、傾斜板間隔の各条件における傾斜板設置位置(図-1の①~③)による傾斜板全体に作用する流体力の時系列変化を図-3 に示す。図中の縦軸 F^* は、作用

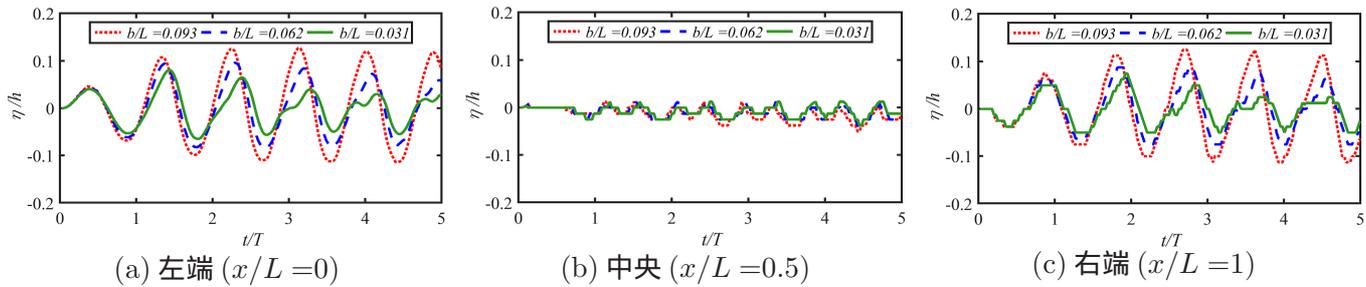


図-2 水面変動

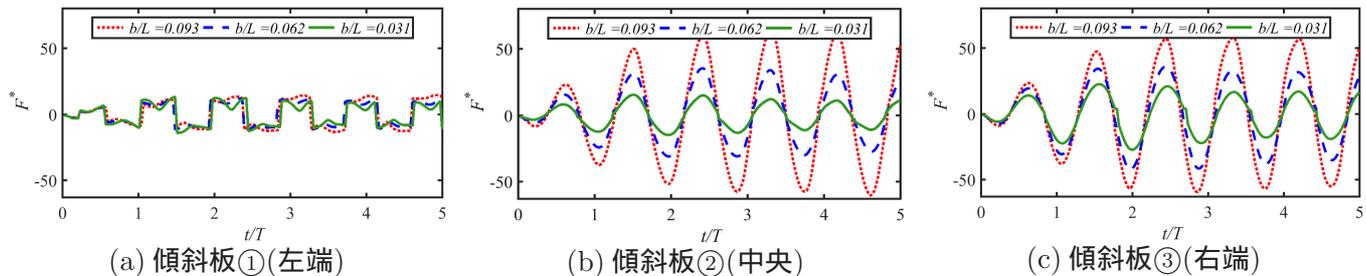


図-3 傾斜板全体に作用する流体力

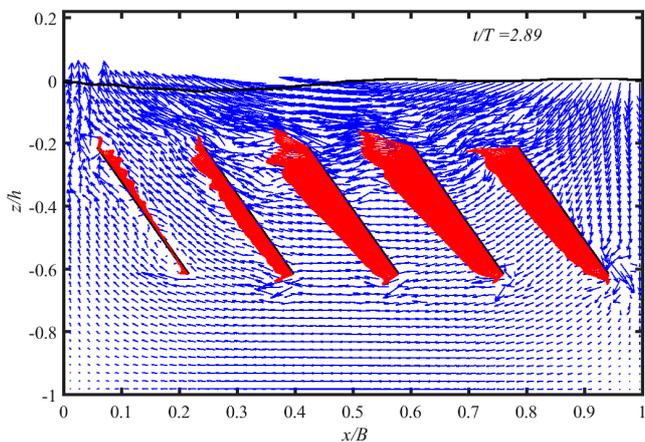


図-4 $t/T=2.6$ における流況及び流体力分布

流体力を $\frac{1}{2}\rho v^2 A$ で無次元化したものである．ここに， $v = a\frac{2\pi}{T} \sin(\frac{2\pi}{T}t)$ ， $A = d \sin \theta$ である．図-3によれば，いずれの条件においても傾斜板に作用する流体力は傾斜板の設置位置によって異なることが分かる．左端の傾斜板に作用する流体力は b/L に関わらず小さく b/L によっても変化しないが，中央及び右端の傾斜板に作用する流体力は， b/L が小さくなるにつれて小さくなっていることが分かる． $b/L=0.093$ の条件で中央，右端の傾斜板に作用する流体力が最大値をとる無次元時間 $t/T = 2.98$ における流況と流体力の分布を図-4に示す．図-4によれば，傾斜板間の流況が場所によって異なることが分かる．左端の傾斜板周辺では傾斜板に沿った流れが卓越している．中央，右端の傾斜板周辺では傾斜板に向かう流れが発生している．図-2によれば，水槽の左右端における水面変動に大

きな差異は見られないが，図-3に示すようにそれらに位置する傾斜板に作用する流体力には大きな差異が見られる．このような傾斜板近傍の流況が作用流体力と密接に関係していると考えられる．また，設置位置が同じであっても b/L によって傾斜板全体に作用する流体力が異なるのは，傾斜板に作用する運動量が b/L によって変化するからだと考えられる．

4. 結論

傾斜板の設置間隔が狭く枚数が多いと水面変動が小さくなるが，スロッピングのモードは変化しないことが明らかになった．また，傾斜板に作用する流体力は設置場所によって異なること，傾斜板周りの流況が場所によって異なることが明らかになった．流れが傾斜板に沿っている左端の傾斜板に作用する流体力が小さく，流れが傾斜板に向かう場所では傾斜板に作用する流体力が大きくなると考えられる．さらに，設置位置が同じであっても b/L によって傾斜板全体に作用する流体力が異なるのは，傾斜板に作用する運動量が b/L によって変化するからだと考えられる．

参考文献

- 1) 平井正裕，藤田聡，小見俊夫，皆川佳祐：スロッピングによる浄水場沈殿池の被害と長周期地震動の影響，機械力学・計測制御講演文集，pp. 204.1-204.5，2014．
- 2) A.L.F. Lima E Silva, A. Silveira-Neto, J.J.R. Damasceno: Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method, Journal of Computational Physics, Vol. 189, pp. 351-370, 2003．
- 3) C.W.Hirt and B.D.Nichols: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of computational physics, pp. 201-205, 1981.